

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté Par : BELHASSAINE Mohammed Abdeldjalil

ABDELMALEK Rihem

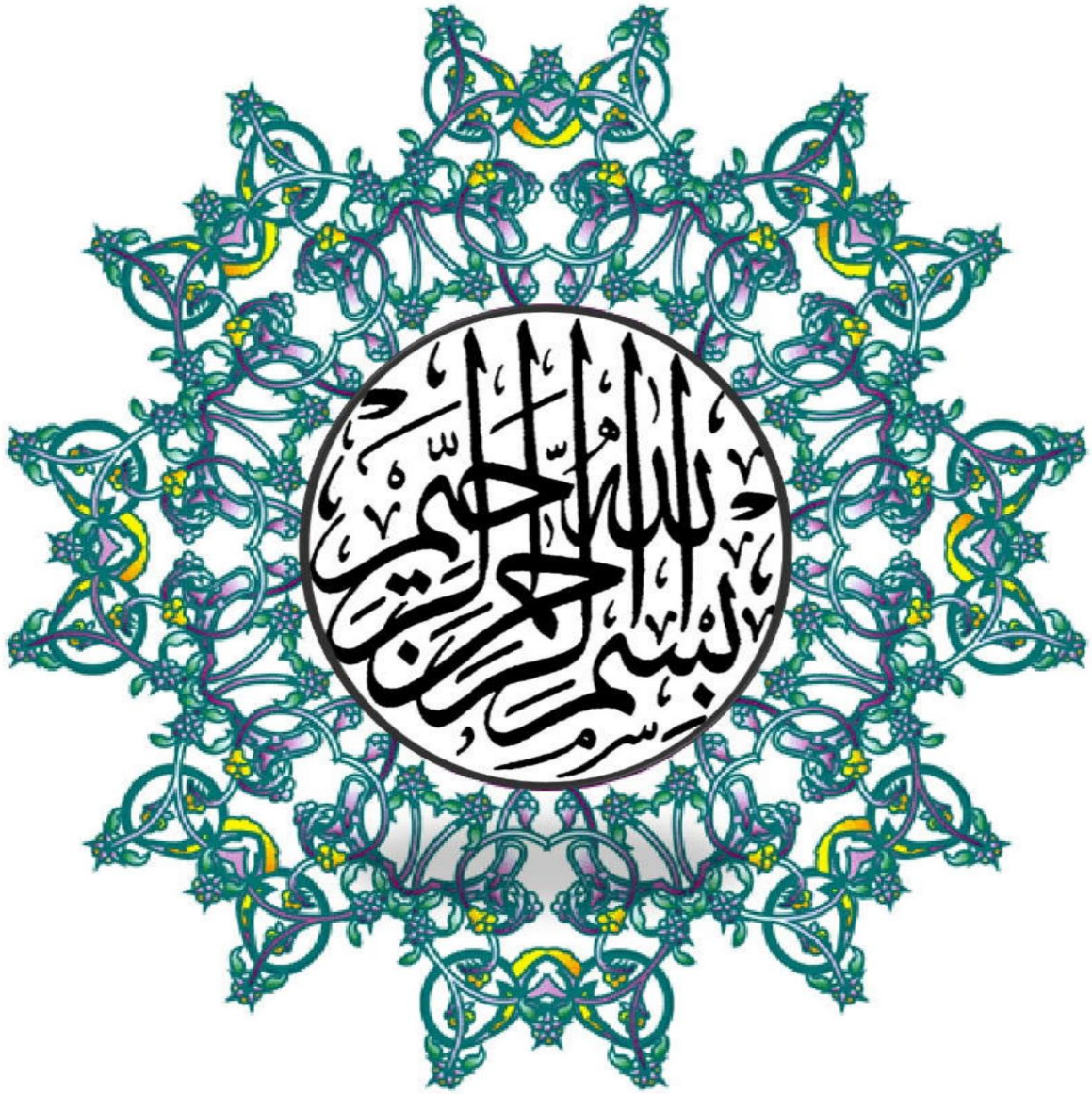
Sujet

Simulation d'une installation solaire thermique : étude thermique et écologique

Soutenu publiquement, le 19 /06 / 2025, devant le jury composé de :

ROSTANE Brahim	PR	Université de Tlemcen	Président
BENAHMED Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
ALIANE Khaled	PR	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2024 /2025



Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadrant Pr ALIANE Khaled pour ses orientations éclairées, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de l'élaboration de notre projet.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à Monsieur ROSTANE Brahim pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider notre jury de soutenance.

Nos remerciements s'adressent également à Madame BENAHMED Lamia pour avoir bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury de soutenance.

Un remerciement particulier à tous les enseignants du département de Génie Mécanique pour leurs enseignements, leur disponibilité et les connaissances transmises tout au long de notre formation.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Du profond du mon cœur, je dédie ce travail a tous qui me sont chers.

A mes chers parents

Aucune dédicace ne pourra jamais être à la hauteur de l'amour, du respect et de la profonde gratitude que je vous dois.

Merci pour chaque sacrifice, chaque geste d'amour, chaque parole d'encouragement qui m'ont portée jusque-là. Depuis mon enfance, vous avez toujours cru en moi, même dans les moments où moi-même je doutais. Ce diplôme, c'est autant le vôtre que le mien.

Mama, vos rêve est devenu réalité, enfin votre petite fille est devenue diplômée comme tu as tant imagine et désirée.

A ma chère sœur Maissa

Je tiens à remercier ma sœur pour l'aide précieuse et étendue qu'elle m'a apportée tout au long de ce projet. Par sa patience, ses conseils et sa présence constante, elle a su m'accompagner dans les moments difficiles comme dans les plus motivants. Son soutien a largement dépassé ce que j'aurais pu attendre, et je lui en suis profondément reconnaissante.

A cher frère Wael

Un grand merci à mon frère pour sa motivation et son soutien tout au long de ce travail. Sa présence m'a donné la force d'avancer et de ne pas baisser les bras.

A ma petite sœur Almass

Loin de mes yeux près du cœur

A mon binôme Abdeljalil

A toute ma famille, a tous mes amis

ABDELMALEK Rihem

Dédicace

C'est avec la plus grande émotion et la plus grande joie que je dédie ce modeste travail à mes chers parents (Nasereddine et HEBRI Saliha) que ne cessent de s'sacrifier pour le bonheur de leur fils.

Je le dédie aussi

- *A mon frère Ilyas*
- *A mes sœurs Imene et Amina*
- *A ma binôme Rihem*
- *A mes chers Amis, Mehdi, Rayan, Adel, Djamel, Razzoug, Kadri, Zaki, yasser, Abdelilah, Abdesamad, Tekki, Houssam, Omar.*
- *A mes collègues de la faculté de Abou bekr belkaid et en Particulier à ma promotion.*
- *A tous les professeurs qui m'ont assisté tout au long de*

Mon cursus.

- *A tout la famille BELHASSAINE et HEBRI*
- *Et à tous ceux et celles qui m'ont soutenu de près ou de*

L'oint, ceux et celles que j'aime et qui me sont chers

Sommaire

Introduction Générale	
Chapitre I : Recherche et analyse bibliographique	
I.1 Introduction	4
I.2 Différents types des installations solaires thermiques	4
I. 2. 1 Chauffe-eau solaire.....	4
I. 2. 1. 1 Définition	4
I. 2. 1. 2 Les différents types de Chauffe-Eau Solaire Individuel	5
I. 2. 1. 2. 1 Le chauffe-eau thermosiphon monobloc	5
I. 2. 1. 2. 2 Le chauffe-eau thermosiphon à éléments séparés	7
I. 2. 1. 2. 3 Le chauffe-eau à circulation forcée	8
I. 2. 2 Chauffage solaire.....	9
I. 2. 2. 1 Définition	9
I. 2. 2. 2 Types d'installations de chauffage.....	10
I. 2. 2. 2. 1 Chauffage solaire avec tampon	10
I. 2. 2. 2. 2 Chauffage solaire par le Plancher Solaire Direct	12
I. 2. 2. 3 Systèmes de chauffage solaire de l'habitat	13
I. 2. 2. 3. 1 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'air chaud	13
I. 2. 2. 3. 2 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'eau chaude	15
I. 2. 3 La centrale solaire :	15
I. 2. 3. 1 Définition :	15
I. 2. 3. 2 Les différents types de centrales	16
I. 2. 3. 2. 1 Systèmes de concentration linéaire	16
I. 2. 3. 2. 1. a Centrales à miroirs cylindro-paraboliques	17
I. 2. 3. 2. 1. b Centrales solaires à miroirs de Fresnel.....	18
I. 2. 3. 2. 2 Systèmes de concentration par foyer.....	18
I. 2. 3. 2. 2. a Centrales à tour :.....	19

Sommaire

I. 2. 3. 2. 2. b Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling :	20
I.3 Paramètres à optimiser dans une installation solaire thermique	21
I. 3. 1 Les paramètres internes	21
I. 3. 1. 1 Influence de vitre.....	21
I. 3. 1. 2 L'orientation et l'inclinaison du capteur	22
I. 3. 1. 3 Influence du l'absorbeur.....	23
I. 3. 1. 4 La circulation du fluide caloporteur	24
I. 3. 1. 5 L'isolation.....	24
I. 3. 1. 6 Influence du Couche d'air	24
I. 3. 1. 7 L'épaisseur de vitre	25
I. 3. 1. 8 Système de stockage thermique	26
I. 3. 2 Paramètres externes.....	27
I. 3. 2. 1 Les paramètres d'ensoleillement.....	27
I. 3. 2. 2 Vitesse du vent.....	27
I. 3. 2. 3 Temperature ambiante	27
I.4 Aspect thermique des installations solaire thermique	28
I. 4. 1 Les Pertes thermiques.....	28
I. 4. 1. 1 Pertes par conduction	28
I. 4. 1. 2 Pertes par convection	28
I. 4. 1. 3 Pertes par rayonnement	28
I. 4. 2 Les différents modes de transferts thermiques dans une capteur installation solaire	28
I. 4. 2. 1 La conduction	28
I. 4. 2. 2 La convection	29
I. 4. 2. 3 Rayonnement.....	29
I. 4. 3 Efficacité thermique d'une installation solaire.....	30
I. 4. 3. 1 Rendement de capteur solaire	30
I. 4. 3. 2 Rendement de l'installation.....	31

Sommaire

I.5 Aspect écologique dans une installation solaire thermique.....	31
I. 5. 1 Aspects écologiques positifs.....	31
I. 5. 1. 1 Une ressource abondante et gratuite	31
I. 5. 1. 2 Réduction des émissions de gaz à effet de serre	32
I. 5. 1. 3 Faible impact environnemental	32
I. 5. 1. 4 Durabilité et longévité.....	32
I. 5. 2 Considérations écologiques à prendre en compte	32
I. 5. 2. 1 Les équipements utiliser dans les installations solaires thermiques	32
I. 5. 2. 2 Emploi des fluides caloporteurs	32
I. 5. 2. 3 Recyclage du système en fin de vie	33
I.6 Aspect économique des installations solaire thermique.....	34
I. 6. 1 Coûts des systèmes solaires thermiques.....	34
I. 6. 2 Bénéfices financiers :	35
I. 6. 3 Coûts d'exploitation et d'entretien.....	35
I. 6. 4 Rentabilité et retour sur investissement	36
I. 6. 5 Mise en comparaison avec d'autres technologies.....	37
I.7 Conclusion.....	37
Chapitre II Modélisation d'une installation solaire thermique	
II.1 Introduction.....	39
II.2 Différents composants d'une installation solaire thermique.....	39
II. 2. 1 Les capteurs	39
II. 2. 1. 1 Définition d'un capteur solaire thermique	39
II. 2. 1. 2 Les types du capteur solaire thermique.....	39
II. 2. 1. 2. 1 Le capteur plan vitré	40
II. 2. 1. 2. 2 Le capteur sous vide.....	41
II. 2. 1. 2. 2. a Les tubes sous vide à flux direct	42
II. 2. 1. 2. 2. b Les tubes sous vide à caloduc	43

Sommaire

II. 2. 1. 2. 3 Le capteur non vitré (Capteur moquette)	44
II. 2. 1. 2. 4 Les capteurs à concentration	45
II. 2. 1. 2. 4. a Capteurs cylindro-paraboliques	45
II. 2. 1. 2. 4. b Les capteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel (LFR).....	46
II. 2. 1. 2. 4. c Les capteurs paraboliques	47
II. 2. 1. 2. 4. d Les Centrales à tour	49
II. 2. 1. 3 Les composants d'un capteur plan :.....	50
II. 2. 1. 3. 1 Vitrage	50
II. 2. 1. 3. 2 Absorbeur	52
II. 2. 1. 3. 3 L'isolation thermique	53
II. 2. 1. 3. 4 Le cadre.....	54
II. 2. 2 Ballon de stockage	54
II. 2. 3 Pompe de Circulateur.....	55
II. 2. 4 Le fluide colporteur.....	55
II. 2. 5 La tuyauterie	56
II. 2. 6 Vase expansion	56
II. 2. 7 Purgeur	57
II. 2. 8 L'échangeur thermique	58
II. 2. 9 Groupe de surécrite	58
II. 2. 10 Clapet anti retour.....	59
II.3 Etude thermique d'une installation de chauffage solaire.....	60
II. 3. 1 Bilan énergétique du capteur	60
II. 3. 2 Bilan énergétique des sous-systèmes	62
II. 3. 3 Énergie délivrée par les capteurs solaires	63
II. 3. 4 Rendement instantané du capteur (rendement optique réel) :.....	63
II. 3. 5 Énergie transmise au circuit (bilan thermique).....	64
II. 3. 6 Énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS).....	64

Sommaire

II. 3. 7 Taux de couverture solaire	64
II. 3. 8 Rendement global du système :	65
II. 3. 9 Économie de CO ₂ :.....	65
II.4 Conclusion	66
Chapitre III Simulation et interprétation	
III.1 Introduction	68
III.2 Présentation de logiciel.....	68
III.3 Spécifications techniques des éléments.....	68
III. 3. 1 Le capteur plan	69
III. 3. 2 Le capteur a tube CPC	69
III. 3. 3 L'accumulateur sanitaire.....	69
III. 3. 4 Le fluide caloporteur	70
III. 3. 5 Rôle de ballon.....	70
III. 3. 6 La pompe	71
III. 3. 7 Chauffage appoint.....	71
III. 3. 8 Les étapes de simulation.....	72
III. 3. 8. 1 Les données techniques du capteur solaire.....	72
III.4 Données météorologiques.....	74
III. 5. 1 Paramètres pour les deux capteurs et le circuit solaire.....	76
III. 5. 1. 2 Les données techniques du réservoir de stockage	78
III. 5. 1. 3 Circuit solaire :	79
III. 5. 1. 4 Le profil de la consommation.....	80
III.6 Présentation de résultats et interprétation.....	83
III. 6. 1 Énergie solaire eau chaud sanitaire (ECS) et énergie d'appoint et énergie et énergie pour le ballon (FigureIII-13) :	84
III. 6. 2 Économie du gaz nature (Figure III-14)	85
III.7 Emission de CO ₂ évitée (Figure III-15)	86

Sommaire

III.8 Taux de couverture et Rendement (Figure III-16).....	87
III.9 La part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie (Figure III-17)	88
III.10 Température maximale journalière dans le capteur (Figure III-21).....	89
III.11 L'évolution de deux indicateurs financiers (Figure III-19).....	90
III.12 Conclusion	91
Conclusion générale	

Liste de figures

Figure I.1: <i>Chauffe-eau thermosiphon monobloc</i>	7
Figure I.2: <i>Chauffe-eau solaire thermosiphon à éléments séparés</i>	8
Figure I.3: <i>Chauffe-eau solaire à circulation forcée</i>	9
Figure I.4: <i>Schéma d'une installation destinée pour le chauffage des maisons</i>	10
Figure I.5: <i>Schéma de principe du chauffage solaire avec tampon</i>	11
Figure I.6: <i>Système de chauffage solaire par le Plancher Solaire Direct</i>	12
Figure I.7: <i>Principe du mur trombe</i>	14
Figure I.8: <i>Miroirs cylindro-paraboliques d'Andosol, Espagne</i>	18
Figure I.9: <i>Centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel</i>	19
Figure I.10: <i>Tour solaire à concentration</i>	20
Figure I.11: <i>Paraboles solaires Dish-Stirling testées à Albuquerque au Nouveau-Mexique</i>	21
Figure I.12: <i>L'influence de vitrage sur les rayons solaires</i>	22
Figure I.13: <i>Orientation d'un capteur solaire</i>	23
Figure I.14: <i>La couche d'air</i>	25
Figure I.15: <i>illustrant la variation de l'épaisseur de la vitre</i>	26
Figure I.16: <i>Rendement thermique de capteur solaire</i>	31
Figure I.17: <i>Composition d'un panneau solaire : tout se recycle</i>	34
Figure II.1: <i>Capteur plan vitré</i>	40
Figure II.2: <i>Schéma des composants de capteur plan vitre</i>	41
Figure II.3: <i>Capteur sous vide</i>	42
Figure II.4: <i>Capteur sous vide a flux direct</i>	43
Figure II.5: <i>Capteur sous vide a caloduc</i>	44
Figure II.6: <i>Capteur non-vitré</i>	45
Figure II.7: <i>Capteur cylindro-paraboliques</i>	46
Figure II.8: <i>Concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel</i>	47
Figure II.9: <i>Concentrateur parabolique avec un moteur Stirling</i>	48
Figure II.10: <i>centrale à tour (les héliostats)</i>	49
Figure II.11: <i>Les différents composants d'un capteur plan</i>	50
Figure II.12: <i>Ballon de stockage</i>	55
Figure II.13: <i>Le vase d'expansion dans une installation solaire à thermosiphon</i>	57
Figure II.14: <i>Purgeur</i>	57
Figure II.15: <i>L'échangeur thermique</i>	58
Figure II.16: <i>Claper anti retour</i>	59

Liste de figures

Figure III.1: <i>Installation de chauffage eau sanitaire</i>	73
Figure III.2: <i>Les donner météorologique</i>	74
Figure III.3: <i>Paramétrer d'installation</i>	75
Figure III.4 : <i>Les paramètres de ballon ECS bivalent</i>	78
Figure III.5: <i>Les donner pour le circuit solaire</i>	79
Figure III.6: <i>Les paramètres de la consommation</i>	80
Figure III.7: <i>Les pertes optiques</i>	81
Figure III.8: <i>Les paramètres de chaudière</i>	82
Figure III.9: <i>Installation ECS</i>	83
Figure III.10: <i>Energie solaire ECS et énergie d'appoint et énergie et énergie pour le ballon</i>	84
Figure III.11: <i>L'économie du gaz nature</i>	85
Figure III.12: <i>Emission de CO2 évitée</i>	86
Figure III.13: <i>Taux de couverture et Rendement</i>	87
Figure III.14: <i>la part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie</i>	88
Figure III.15: <i>Température maximale journalière dans le capteur</i>	89
Figure III.16: <i>L'évolution de deux indicateurs financiers</i>	90

Liste des tableaux

Tableau I.1: <i>Illustre le lien entre l'épaisseur du verre et le rayonnement solaire total pour la région d'Alger</i>	26
Tableau I.2: <i>les postes de dépense typiques</i>	35
Tableau II.1: <i>Quelques caractéristiques optiques des verres [30]</i>	51
Tableau II.2: <i>Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur</i>	52
Tableau II.3: <i>Revêtements des surfaces d'absorbeur</i>	53
Tableau III.1: <i>Les données météorologiques</i>	76
Tableau III.3: <i>Résultats de simulation annuelle pour les deux variants</i>	91

Résumé

L'étude porte sur l'évaluation d'un système thermique solaire destiné à la production d'eau chaude sanitaire utilisant deux capteurs distincts. Elle aborde dans un premier temps les aspects théoriques, thermiques, environnementaux et économiques des différents types d'installation solaires thermiques, ainsi que les facteurs influençant leur rendement. Dans un second temps, les composants de ces systèmes et les différents capteurs seront analysés. Enfin, une simulation annuelle du système de production d'eau chaude sera réalisée avec les deux capteurs, suivie d'une analyse comparative portant sur : l'énergie solaire produite, les économies de gaz naturel, la réduction des émissions de CO₂, le taux de couverture des besoins en eau chaude, l'efficacité du système, ainsi que l'évolution des *indicateurs financiers*.

Mots clés : Énergie solaire thermique, Installation solaire, Chauffe-eau solaire.

Abstract

This study evaluates a solar thermal system designed for domestic hot water production using two distinct collector types. The research methodology follows three key phases: First, it examines the theoretical, thermal, environmental, and economic aspects of different solar thermal installations along with their efficiency-determining factors. Second, it analyzes the system components and various sensor technologies employed. Finally, the study conducts an annual simulation of the hot water production system comparing both collectors, followed by a comprehensive performance analysis covering: solar energy yield, natural gas savings, CO₂ emission reductions, hot water demand coverage rate, system efficiency, and financial performance indicators.

ملخص

يتعلق الموضوع بدراسة نظام حراري شمسي يهدف إلى إنتاج الماء الساخن المنزلي ب استخدام جهاز زي إستشعارمختلفين. تتعلق الدراسة في المقام الأول بالجزء النظري والجزء الحراري والطبيعي والاقتصادي حول المجمعات الحرارية الشمسية المختلفة مع التركيز على العوامل المؤثرة في كفاءتها التشغيلية ومردوديتها. ثانيًا، ستم دراسة مكونات هذه أنظمة ومختلف أجهزة الاستشعار. وثالثًا، إجراء محاكاة سنوية لنظام إنتاج الماء الساخن ب إستخدام جهازين استشعار مختلفين وإجراء مقارنة من حيث طاقة شمسية منتج والغاز الطبيعي مقتصد والانبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون 2 مجتنب ومعدل تغطية الماء الساخن وكفاءة النظام إضافة إلى تطور مؤشر المالي.

Nomenclature

G	Intensité de rayonnement	[W/m²]
G*	Rayonnement direct reçu au sol par ciel moyen	[W/m ²]
α_v	Facteur d'absorption du verre	[m ⁻¹]
x	Épaisseur de la vitre	[cm]
ϕ	flux de chaleur	[W]
K	Coefficient de conductivité thermique	[W/m. K]
A	Surface d'échange	[m ²]
h	Coefficient de convection	[W/m ² .K]
S	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide	[m ²]
T_p	Température de la paroi solide	[K] ou [°C]
T_f	Température du fluide	[K] ou [°C]
ϵ	Émissivité thermique du matériaux	—
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m ² .K ⁴
T	Température absolue de la corp	[K]
Q_{sa}	Flux solaire absorbé	[W/m ²]
Q_{s→p}	Flux perdu par la paroi absorbante	[W/m ²]
Q_u	Flux utile transmis au fluide caloporteur	[W/m ²]
Q_{st}	Flux stocké dans le capteur	[W/m ²]
M_e	Masse en eau du capteur	[Kg]
C_{eau}	La capacité thermique massique de l'eau	[J/(kg·K)]

Nomenclature

T	Température moyenne du capteur	[K] ou [°C]
t	Temps	[s]
τ_{cs}	Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire	—
α_{PS}	Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire	—
$G_{(i,y)}^*$	Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur	[W. m ⁻²]
q_{cf}	Débit calorifique du fluide caloporteur	[W.°C ⁻¹]
T_{fs}	Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur	[k] ou [°C]
T_{fe}	Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur	[k] ou [°C]
hp	Coefficient global de pertes du capteur	[W/(m ² ·K)]
T_{pm}	Température moyenne de la paroi absorbante	[K] ou [°C]
T_a	Température de l'air extérieur	[K] ou [°C]
S	Surface de la paroi absorbante	[m ²]
I_c	Intensité des radiations solaires dans le plan du capteur	[W/m ²]
η_0	Efficacité optique du capteur	—

Nomenclature

U	Coefficient global de perte thermique du capteur	[W/(m ² ·K)]
q_r	Chaleur stockée dans le réservoir	[KJ]
T_{ap}	Température appoint	[K] ou [°C]
T_r	Température de réservoir	[K] ou [°C]
T_u	Température utile	[K] ou [°C]
A_r	Surface du réservoir	[m ²]
Q_u	Chaleur utilisée	[KJ]
m[·]	Débit massique du fluide	[kg/s]
CP	Capacité calorifique spécifique du fluide	[kJ/kg·K]

Nomenclature

Abréviation

ECS	Eau Chaude Sanitaire
ECSI	Chauffe-Eau Solaire Individual
SSC	Système Solaire Combiné
PSD	Plancher Solaire Direct
LFR	Capteur à réflecteurs linéaire de Fresnel (Linear Fresnel Reflector).
PTC	Capteur cylindro-parabolique (Parabolique Trough Collector)
EPDM	Éthylène Propylène Diène Monomère
SES	Stirling Energy System
U. V	Les rayons ultraviolets
I.R	L'infrarouge
CPC	Concentrateur parabolique composé (Compound Parabolic Concentrator)
CP	Capteur Plan

Introduction Générale

Introduction Générale

Face à l'urgence climatique et à la nécessité de réduire la dépendance aux énergies fossiles, le développement des énergies renouvelables s'impose comme une solution incontournable. Dans ce contexte, l'énergie solaire thermique se distingue par son potentiel élevé pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS), particulièrement dans les régions fortement ensoleillées comme le cas de notre site implanté à Tlemcen (Algérie), où les conditions climatiques offrent un gisement solaire abondant et exploitable.

Ce projet de fin d'études (PFE) s'inscrit dans une démarche à la fois technique, énergétique et environnementale, visant à comparer deux configurations distinctes d'une installation solaire thermique destinée à couvrir les besoins en ECS d'une maison individuelle dans le site étudié. La première configuration (variant 01), utilise des capteurs solaires plans a tube (CPC), connus pour leur haut rendement, tandis que la deuxième configuration (variant 02), emploie des capteurs plans (CP), plus conventionnels mais largement répandus pour leur fiabilité et leur coût modéré.

L'étude repose sur une méthodologie rigoureuse de simulation numérique à l'aide du logiciel T*SOL, qui permet de modéliser les performances des deux systèmes dans des conditions identiques (même ensoleillement, mêmes besoins en ECS, mêmes caractéristiques de stockage, etc...). Les paramètres analysés incluent non seulement l'efficacité énergétique (rendement, température de l'eau produite, couverture des besoins), mais aussi l'impact environnemental (réduction des émissions de CO₂) et la viabilité économique (coût d'investissement, temps de retour sur investissement).

Au-delà de la simple comparaison technologique, ce travail a pour ambition d'offrir des recommandations pratiques pour le dimensionnement et le choix des capteurs solaires dans la région de Tlemcen, en tenant compte des contraintes locales (variations

Introduction Générale

Saisonniers, besoins réels des ménages, accessibilité des technologies). Les résultats obtenus pourront ainsi servir de référence pour les futurs projets d'installations solaires thermiques, contribuant à la promotion d'une énergie propre et durable en Algérie.

En somme, cette étude se positionne à l'intersection de l'innovation technologique et du développement durable, avec pour finalité d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire dans un cadre résidentiel, tout en apportant une pierre à l'édifice de la transition énergétique nationale.

**Chapitre I : Recherche
et analyse
bibliographique**

I.1 Introduction

L'énergie solaire thermique est un procédé de la transformation de l'énergie présente dans les rayons solaires en chaleur. Cette transformation en chaleur et donc en énergie thermique permet de chauffer un fluide s'appelle un fluide caloporteur. On peut utiliser cette énergie dans des différents d'installations solaires :

- En usage direct : chauffe-eau, chauffage solaire
- En usages indirect : centrales solaires thermodynamique

Ces installations ont affecté par des paramètres externes et internes qui peuvent être améliorés pour augmenter les performances de ces systèmes.

L'installation solaire thermique est une solution écologique et économique, qui permettant de réduire la consommation d'énergie fossile par des conséquences de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et de réaliser des économies d'énergie considérables.

I.2 Différents types des installations solaires thermiques

Les installations solaires thermiques peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment leur usage final, leur technologie de captation, et leur mode de stockage de la chaleur. Cette classification permet de mieux comprendre les différentes configurations possibles en fonction des besoins énergétiques et des contraintes techniques.

Voici un aperçu des principaux types d'installations solaires thermiques :

I. 2. 1 Chauffe-eau solaire

I. 2. 1. 1 Définition

Un chauffe-eau solaire est un appareil conçu pour capter l'énergie du soleil afin de produire, en tout ou en partie de l'eau chaude sanitaire (ECS).

Il est généralement utilisé en complément d'autres systèmes de production d'eau chaude fonctionnant à l'électricité, aux énergies fossiles ou à la biomasse. Dans certains cas, il peut même les remplacer entièrement.

Comme l'énergie solaire est une ressource renouvelable, son utilisation permet de réduire de manière significative les émissions de gaz à effet de serre ainsi que la production de déchets issus de l'énergie nucléaire. [1]

Le Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI) est un dispositif thermo solaire destiné à la production d'eau chaude à partir de l'énergie solaire. Il peut répondre à divers besoins tels que l'eau chaude sanitaire, les usages domestiques (cuisine, lave-linge) ou encore le chauffage de piscine.

Le système est principalement composé de capteurs solaires thermiques, chargés de capter le rayonnement solaire, et d'un ballon de stockage dans lequel l'eau chauffée est accumulée.

Comment fonctionne un chauffe-eau solaire ?

Les capteurs solaires installés sur les panneaux thermiques absorbent l'énergie solaire et la transmettent à un fluide caloporteur. Ce fluide circule jusqu'au ballon de stockage où un échangeur thermique permet le transfert de chaleur vers l'eau sanitaire. Une fois refroidi, le fluide retourne vers les capteurs pour recommencer un nouveau cycle. [2]

I. 2. 1. 2 Les différents types de Chauffe-Eau Solaire Individuel

I. 2. 1. 2. 1 Le chauffe-eau thermosiphon monobloc

Principe du thermosiphon

La circulation de l'eau repose sur le principe du thermosiphon : chauffée par les capteurs solaires, l'eau devient moins dense et s'élève naturellement vers l'échangeur thermique du ballon de stockage, situé au-dessus des capteurs.

Ce type de chauffe-eau solaire individuel (CESI) convient particulièrement aux territoires d'outre-mer, car il limite les risques de gel des conduites d'eau chaude. Toutefois,

il est généralement moins performant qu'un système à éléments séparés, notamment en raison du positionnement horizontal du ballon de stockage à l'extérieur du logement. De plus, l'intégration d'un dispositif d'appoint dans le ballon réduit encore l'efficacité globale du système.

Avantages

- Système monobloc : capteurs et ballon sur un même châssis.
- Installation facile et coût réduit.
- Fonctionnement autorégulé.
- Continue à produire de l'ECS en cas de coupure électrique.
- Fiabilité.

Inconvénients

- Esthétique peu soignée.
- Inadapté aux régions froides (utilisation directe de l'eau).
- Ballon exposé aux conditions extérieures.
- Poids élevé, difficile à installer en toiture.
- Température de stockage limitée par soupapes thermiques. [3]

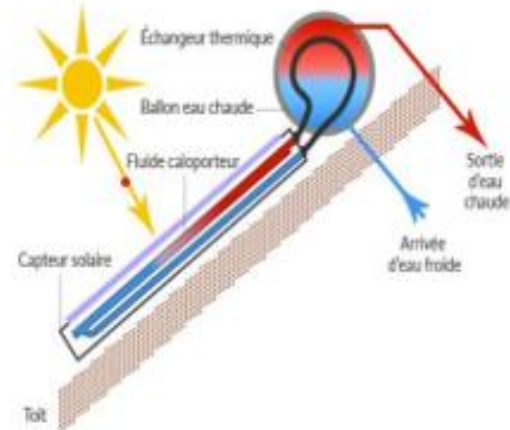


Figure I.1: *Chauffe-eau thermosiphon monobloc*

I. 2. 1. 2. 2 Le chauffe-eau thermosiphon à éléments séparés

Principe

Ce chauffe-eau fonctionne également selon le principe du thermosiphon, mais avec une configuration à éléments séparés : les capteurs sont installés à l'extérieur, tandis que le ballon de stockage est placé à l'intérieur du bâtiment.

Avantages

- Assure la production d'eau chaude solaire même en cas de coupure de courant électrique.
- Fonctionne sans système de régulation.
- Très fiable, avec peu de risques de panne.

Inconvénients

- Installation technique : respect strict des consignes du fabricant (pentes, diamètres, dénivelé entre capteurs et ballon).
- Température du ballon régulée par des soupapes thermiques. [3]



Figure I.2: *Chauffe-eau solaire thermosiphon à éléments séparés*

I. 2. 1. 2. 3 Le chauffe-eau a circulation forcée

Principe

La circulation du liquide caloporteur entre les capteurs et le ballon est assurée par un circulateur commandé par une régulation. Le circuit se met en marche lorsque l'écart de température entre les capteurs et le bas du ballon dépasse un seuil ΔT , généralement autour de 6 K.

Avantages

- S'adapte à tout type d'habitat.
- Faible risques de pannes.
- Bon rendement global.
- Température du ballon contrôlé grâce à la régulation.

Inconvénients

- Un système de régulation différentielle est requis pour piloter le circulateur.
- Besoin d'une alimentation électrique.
- Un liquide caloporteur antigel de qualité alimentaire est nécessaire, sauf dans les régions chaudes. [3]

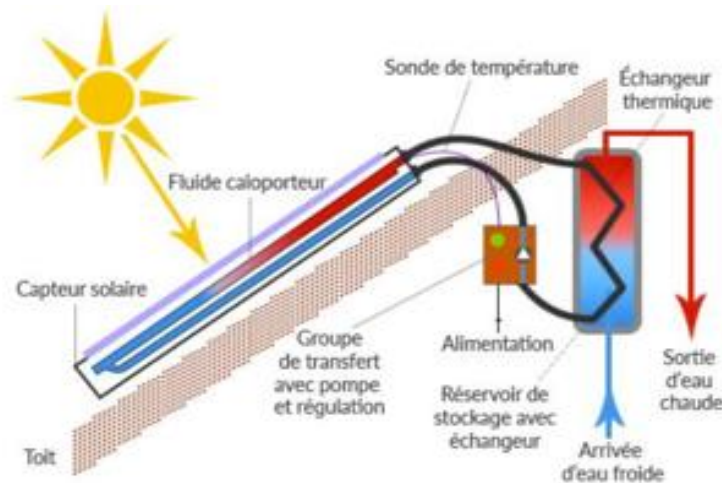


Figure I.3: *Chauffe-eau solaire à circulation forcée*

I. 2. 2 Chauffage solaire

I. 2. 2. 1 Définition

La chaleur accumulée par le fluide (un mélange d'eau et d'antigel) est utilisée pour chauffer l'habitation. Il s'agit d'un système de chauffage solaire à eau chaude, où la chaleur est généralement diffusée soit par des radiateurs, soit plus fréquemment par un plancher chauffant. Dans ce système, le fluide transmet son énergie thermique à la dalle, laquelle redistribue ensuite cette chaleur à l'air ambiant de la maison. La dalle joue donc un rôle d'intermédiaire entre le fluide caloporteur et l'air intérieur.

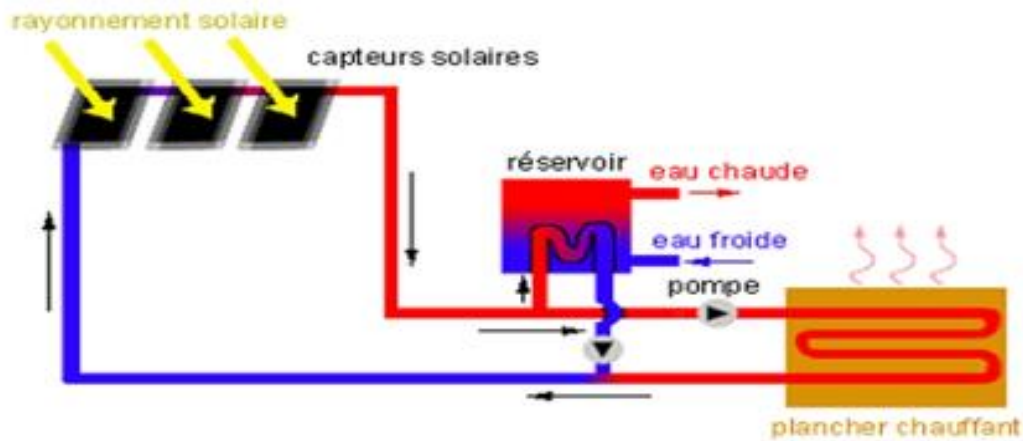


Figure I.4: Schéma d'une installation destinée pour le chauffage des maisons

Le réservoir d'eau chaude peut remplir deux rôles :

- Il peut être utilisé la nuit pour alimenter en chaleur la dalle de la maison, puisque les capteurs solaires ne peuvent plus chauffer le fluide durant cette période. Une réserve de chaleur est alors nécessaire pour assurer le chauffage central, ou à défaut, recourir à un système de chauffage traditionnel.
- Il peut également servir de chauffe-eau pour fournir l'eau chaude sanitaire.

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement consiste à transférer la chaleur captée par les panneaux solaires vers des radiateurs de grande surface ou vers un plancher chauffant, notamment dans les constructions neuves. Le chauffage des locaux se fait sans utiliser de système d'appoint, car l'installation solaire n'est pas conçue pour couvrir l'intégralité des besoins en chauffage. [4]

I. 2. 2. 2 Types d'installations de chauffage

I. 2. 2. 2. 1 Chauffage solaire avec tampon

La première solution repose sur l'utilisation d'un ballon de stockage solaire tampon, de capacité variable, qui permet d'assurer le chauffage du bâtiment même lors de

périodes prolongées de faible ensoleillement. Aujourd'hui, il est courant d'installer un unique ballon de stockage combiné afin de réduire l'encombrement et de simplifier à la fois la construction et la régulation du système. Dans le secteur résidentiel, on parle de SSC (Système Solaire Combiné) lorsqu'il s'agit de chauffer simultanément une habitation et produire l'eau chaude sanitaire.

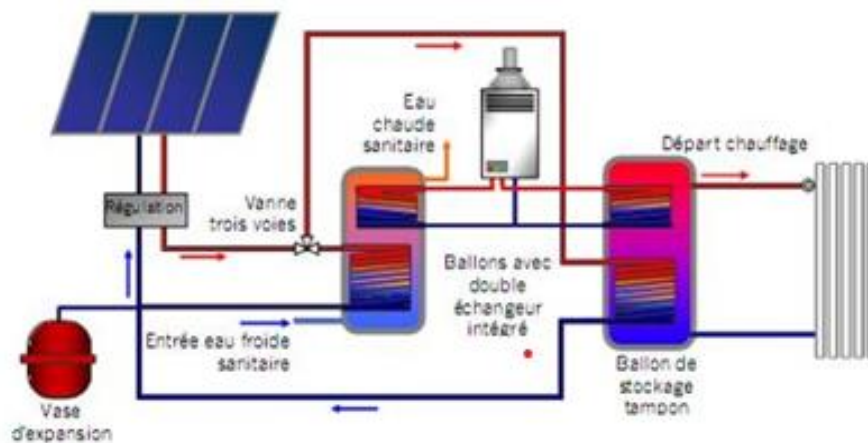


Figure I.5: Schéma de principe du chauffage solaire avec tampon

Avantages

- Chauffage solaire automatique avec appoint automatique en cas de besoin.
- Installation possible d'un plancher chauffant et/ou de radiateurs à basse température.
- Économies d'énergie et réduction des coûts plus importantes qu'avec un chauffe-eau solaire individuel (CESI).

Inconvénients

- Système plus complexe que le plancher solaire direct (régulation, ballon de stockage...).
- Coût plus élevé par rapport au Plancher Solaire Direct (PSD).
- Nécessite un espace suffisant pour installer le ballon de stockage (au moins 500 litres). [5]

I. 2. 2. 2. 2 Chauffage solaire par le Plancher Solaire Direct

La seconde installation envoie directement le fluide caloporteur des capteurs solaires dans un circuit de tuyaux intégrés à la dalle en béton. Grâce à l'inertie thermique de la dalle, d'une épaisseur de 10 à 15 cm, elle restitue l'énergie stockée durant la journée en soirée.

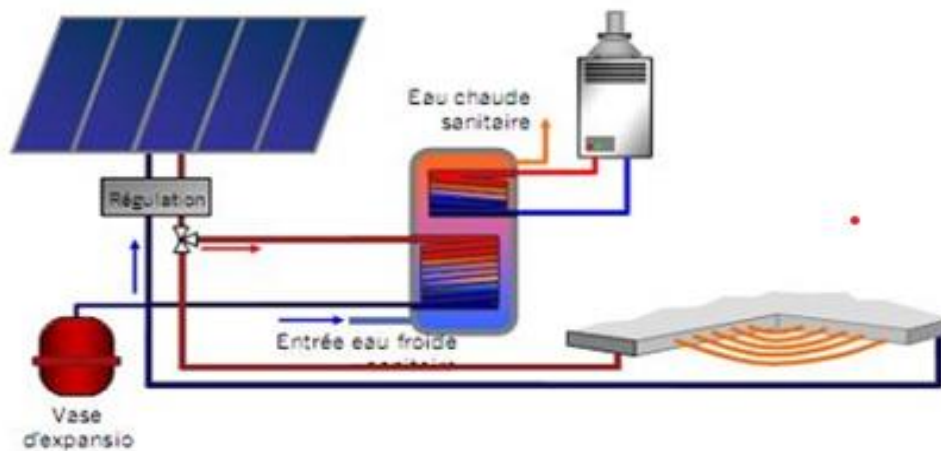


Figure I.6: Système de chauffage solaire par le Plancher Solaire Direct

- L'appoint peut être intégré au système solaire. Dans ce cas, le plancher chauffant ou les radiateurs diffusent la chaleur supplémentaire produite par une résistance électrique, une chaudière gaz ou fuel.

Avantages

- Confort thermique optimal grâce à une diffusion homogène de la chaleur par le sol.
- Gain d'espace grâce à l'intégration du stockage solaire dans le plancher.
- Excellente inertie thermique : restitution de la chaleur accumulée même durant la nuit.
- Système solaire simple permettant de réduire de moitié les coûts de chauffage.
- Système moins coûteux que le système solaire combiné.

Inconvénients

- Nécessite un revêtement de sol adapté (parquet ou carrelage) pour une efficacité optimale, la moquette étant déconseillée. [5]

I. 2. 2. 3 Systèmes de chauffage solaire de l'habitat

Tous les types de bâtiments, qu'ils soient résidentiels ou destinés au secteur tertiaire, ont besoin de systèmes de chauffage plus ou moins élaborés afin d'assurer un confort thermique. Selon les saisons, ces systèmes fournissent de la chaleur ou de la fraîcheur, avec des niveaux d'efficacité variables (offrant un meilleur confort pour une consommation réduite). On distingue les systèmes de chauffage selon le fluide caloporteur utilisé : soit à eau chaude, soit à air chaud. [6]

I. 2. 2. 3. 1 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'air chaud

Pour chauffer l'air, il est possible de le faire circuler derrière des panneaux métalliques noirs installés dans des châssis vitrés situés sur le toit ou la terrasse d'un bâtiment.

L'air ainsi réchauffé peut ensuite être distribué à l'intérieur par un système de chauffage à air pulsé, via un réseau de canalisations.

De nombreuses études, aussi bien expérimentales que numériques, ont été menées afin d'améliorer ce type de chauffage solaire pour l'habitat. On peut notamment citer les principales approches suivantes :

- **Procédé du professeur Trombe (mure de Trombe)**

En France, les recherches du professeur Félix Trombe ont permis de développer un système de chauffage des maisons utilisant l'air chaud. La nuit, le chauffage est assuré par la chaleur stockée pendant la journée dans des murs à forte masse thermique.

Ce système passif est aujourd'hui l'un des plus utilisés. Son principe est très simple : le

soleil traverse une ou plusieurs vitres et chauffe une paroi verticale qui peut faire partie de la structure du bâtiment.

L'air qui touche cette paroi se réchauffe, ce qui déclenche une circulation naturelle. L'air entre par des ouvertures en bas du mur et ressort dans la pièce par des ouvertures en haut (voir Figure I.7).

Ce système de chauffage peut continuer à fonctionner après le coucher du soleil, grâce au stockage partiel de la chaleur reçue par le mur.

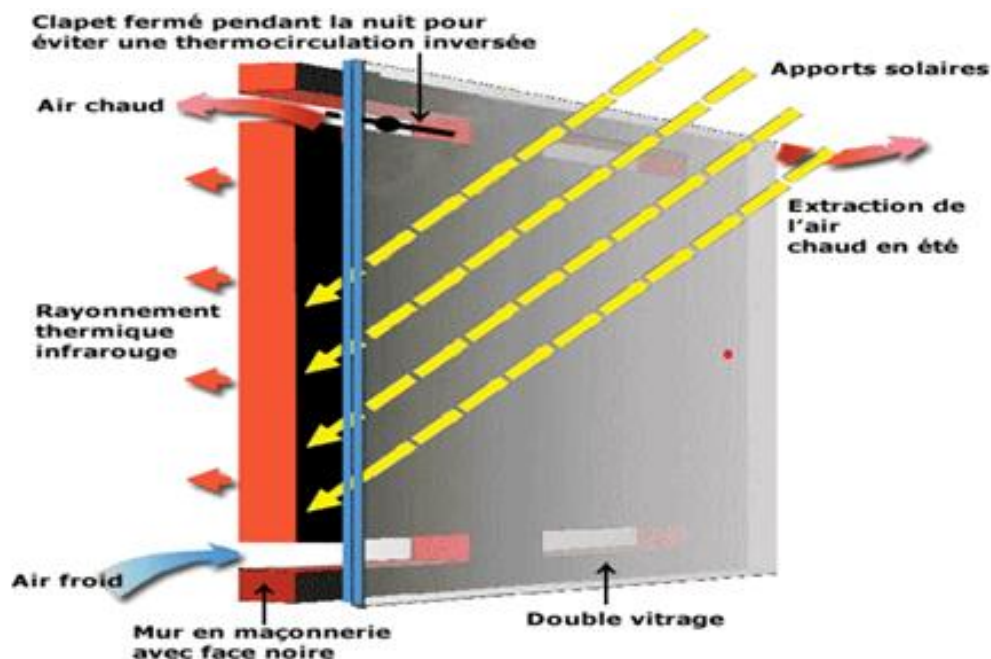


Figure I.7 : Principe du mur trombe

Solaire passif : L'objectif du solaire passif est la conception et la construction de bâtiments qui restent chauds en hiver et frais en été grâce à l'énergie solaire. En hiver, les rayons du soleil traversent les vitrages des portes et fenêtres pour réchauffer l'intérieur. En été, des stores sont utilisés pour garder la fraîcheur.

On parle de solaire « passif » car il n'y a pas de transfert actif de chaleur, c'est-à-dire sans utiliser de pompes, de vannes ou d'électricité. [7]

I. 2. 2. 3. 2 Systèmes de chauffage solaire par circulation d'eau chaude

Il existe principalement deux types courants de dispositifs de chauffage solaire par circulation d'eau chaude :

- Les chauffe-eaux solaires individuels (CESI), auxquels on peut associer les chauffe-eaux solaires collectifs.
- Les systèmes solaires combinés (SSC) utilisés pour le chauffage des locaux. [7]

I. 2. 3 La centrale solaire :

I. 2. 3. 1 Définition :

Un système solaire à concentration thermodynamique capte le rayonnement solaire en concentrant les flux de photons à l'aide de miroirs ou de lentilles. Cette concentration permet de focaliser l'énergie sur un point ou une ligne, atteignant ainsi des températures bien plus élevées que celles générées par les systèmes solaires thermiques classiques non concentrés.

Le photovoltaïque n'est pas la seule technologie solaire capable de produire de l'électricité. Alors que les chauffe-eau solaires domestiques se limitent généralement à des températures d'environ 50 °C, les systèmes à concentration permettent de chauffer des fluides à des températures pouvant atteindre entre 250 et 1 000 °C. De telles températures rendent possible leur utilisation dans des procédés industriels, notamment pour la production d'électricité – on parle alors d'électricité solaire thermodynamique. D'autres applications directes ou indirectes des fluides chauffés sont également envisageables, telles que le dessalement de l'eau de mer, la climatisation (via des cycles d'absorption) ou encore la production d'hydrogène. [8]

Le principe de concentration

Le principe de concentration de l'irradiation solaire est connu depuis l'Antiquité, comme en témoigne le célèbre mythe des « miroirs ardents » d'Archimède. À l'aide de miroirs ou de lentilles, il est possible de rediriger le rayonnement solaire capté sur une surface étendue vers une cible beaucoup plus réduite. Ce principe de concentration, fondé sur la focalisation de l'énergie solaire, est le même que celui utilisé lorsqu'on enflamme des feuilles mortes avec une loupe. [8]

Le fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent un grand nombre de miroirs pour concentrer les rayons solaires sur un fluide caloporteur, porté à haute température. Pour assurer un rendement optimal tout au long de la journée, ces miroirs réfléchissants sont montés sur des systèmes de suivi solaire (héliostats) qui leur permettent de suivre la trajectoire du Soleil. La chaleur ainsi accumulée est ensuite transformée en électricité grâce à un cycle thermodynamique mettant en œuvre des turbines à vapeur ou à gaz. On distingue principalement quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques, leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour solaire, et enfin les concentrateurs paraboliques de type Dish-Stirling. [8]

I. 2. 3. 2 Les différents types de centrales

I. 2. 3. 2. 1 Systèmes de concentration linéaire

Le rayonnement solaire est concentré sur un ou plusieurs tubes absorbeurs placés le long de la ligne focale des miroirs. Ces tubes contiennent un fluide caloporteur, chauffé à des températures comprises entre 250 et 500 °C, selon le type d'installation.

« Les miroirs réfléchissants suivent le mouvement du Soleil tout au long de la journée. »

I. 2. 3. 2. 1. a Centrales à miroirs cylindro-paraboliques

Il s'agit aujourd'hui de la technologie la plus répandue dans le domaine de la solaire thermodynamique. Contrairement à une parabole dont le foyer est un point, un miroir cylindro-parabolique concentre le rayonnement solaire le long d'un axe. Un tube absorbeur, appelé récepteur, est placé sur cet axe. De couleur noire pour maximiser l'absorption du rayonnement, ce tube contient un fluide caloporteur qui est chauffé jusqu'à environ 500 °C. Ce fluide chaud est ensuite acheminé vers un bloc de production électrique où il permet de générer de l'électricité. L'ensemble miroir cylindro-parabolique et récepteur est monté sur un système de suivi uni axial afin de suivre le déplacement du Soleil au cours de la journée. [8]



Figure I.8: *Miroirs cylindro-paraboliques d'Andosol, Espagne*

I. 2. 3. 2. 1. b Centrales solaires à miroirs de Fresnel

Afin d'éviter le recours à des miroirs courbes, dont la fabrication est complexe et onéreuse, la technologie des miroirs de Fresnel propose une alternative plus économique. Elle consiste à imiter la forme d'un miroir cylindro-parabolique à l'aide d'une série de miroirs plans ou faiblement incurvés, tous installés à un même niveau horizontal. Dans ce système, seuls les miroirs sont mobiles pour suivre la course du Soleil, tandis que la structure de support et le tube absorbeur, positionné en hauteur, restent fixes. Ce choix technologique permet de réduire les coûts d'installation et de maintenance. En contrepartie, la qualité de la concentration du rayonnement est moindre, car la géométrie parabolique n'est qu'approximativement reproduite. Le pari économique repose donc sur le fait que les économies réalisées compensent la légère perte d'efficacité. À ce jour, ce type de centrale demeure encore peu répandu. [8]



Figure I.9: Centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel

I. 2. 3. 2. 2 Systèmes de concentration par foyer

Le rayonnement solaire est concentré jusqu'à un facteur d'environ 1 000 vers un foyer unique de petite taille, où la température peut atteindre entre 500 et 1 000 °C.

I. 2. 3. 2. 2. a Centrales à tour :

Des centaines de miroirs orientables, appelés *héliostats*, suivent la trajectoire du Soleil et réfléchissent le rayonnement solaire vers un récepteur central situé au sommet d'une tour. Ce récepteur contient un fluide caloporteur chauffé à haute température. Comme dans les systèmes à miroirs cylindro-paraboliques, la chaleur du fluide est ensuite convertie en électricité via un cycle à vapeur conventionnel. Comparée à une configuration cylindro-parabolique, la centrale à tour présente l'avantage de ne pas nécessiter la circulation du fluide à travers l'ensemble du champ de miroirs, ce qui réduit considérablement les pertes thermiques. En outre, le niveau de concentration du rayonnement peut y être bien plus élevé, améliorant ainsi le rendement global du cycle thermodynamique. Toutefois, ces performances techniques ne prennent tout leur sens que si elles se traduisent par un avantage technico-économique, ce qui reste à nuancer en raison des coûts importants liés à la construction de la tour. [8]



Figure I.10: *Tour solaire à concentration*

I. 2. 3. 2. 2. b Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling :

La technologie Dish-Stirling repose sur une parabole concentrant le rayonnement solaire en un point focal, où est placé un moteur de type Stirling. Ce moteur fonctionne en circuit fermé : le gaz qu'il contient est chauffé par la concentration solaire, ce qui provoque l'expansion du fluide et actionne un piston, transformant ainsi l'énergie thermique en énergie mécanique. Bien que cette technologie offre un rendement élevé, elle reste peu adaptée à la production d'électricité à grande échelle en raison de ses coûts d'investissement élevés, ce qui freine son développement industriel. Elle présente toutefois un avantage notable : c'est la seule technologie solaire thermodynamique réellement adaptée à des installations autonomes de petite taille, notamment dans des zones isolées.

[8]



Figure I.11: *Paraboles solaires Dish-Stirling testées à Albuquerque au Nouveau-Mexique*

I.3 Paramètres à optimiser dans une installation solaire thermique

La performance thermique d'un capteur solaire dépend de nombreux éléments qui interagissent entre eux. Le choix des matériaux, la forme et la taille du capteur, ainsi que ses propriétés internes (comme sa capacité à absorber et à retenir la chaleur) jouent un rôle clé. De plus, son orientation et son inclinaison, ainsi que les conditions extérieures (ensoleillement, température, vent...) ont aussi un impact important.

Pour mieux comprendre ces influences, on peut les classer en deux grandes catégories :

- Les facteurs liés à la conception du capteur (matériaux, dimensions, technologie utilisée...)
- Les facteurs externes (conditions météo...)

Cette distinction permet d'adapter soit la fabrication du capteur, soit son installation, pour en optimiser l'efficacité.

I. 3. 1 Les paramètres internes

I. 3. 1. 1 Influence de vitre

Dans une installation solaire thermique, le vitrage joue un rôle clé : il agit comme une fenêtre intelligente qui laisse passer la lumière du soleil tout en piégeant la chaleur à l'intérieur. Grâce à ses propriétés transparentes, il permet aux rayons solaires d'atteindre l'absorbeur, où l'énergie est convertie en chaleur utile. Mais son rôle ne s'arrête pas là !

En plus d'optimiser la captation de l'énergie, le vitrage protège les composants internes (comme les tubes ou les plaques absorbantes) contre les intempéries, la poussière et les variations brutales de température. Il agit comme un isolant thermique, réduisant les pertes de chaleur et améliorant ainsi l'efficacité globale du système.

T. Koyuncu , Il a mené une étude expérimentale sur l'impact du nombre de couvertures et a découvert que ce facteur a une forte influence sur l'efficacité du capteur.[9]

S. Youcef-Ali , Il a démontré dans une étude expérimentale que la couverture triple offre de meilleures performances que celle à double vitrage, en raison de la réduction des pertes vers l'extérieur. [10]

D. Njomo , Il a indiqué, selon une étude numérique, qu'un capteur avec une double couverture de matériaux différents (plexiglas pour la couverture extérieure et verre pour l'intérieur) offre de meilleures performances qu'un capteur à deux vitres du même matériau. [11]

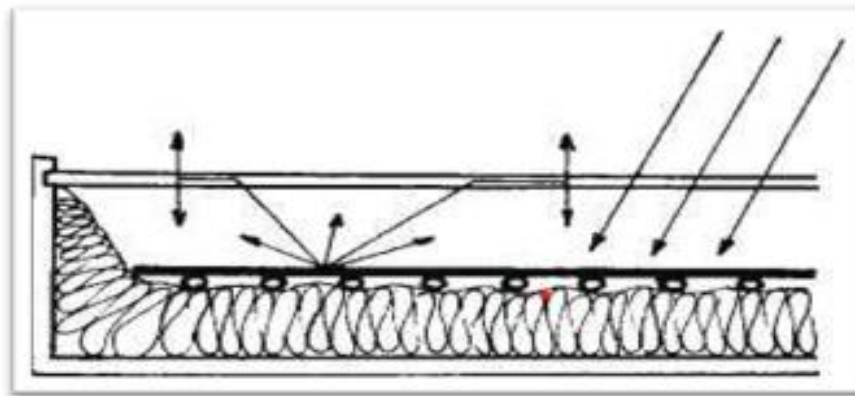


Figure I.12: *L'influence de vitrage sur les rayons solaires*

I. 3. 1. 2 L'orientation et l'inclinaison du capteur Orientation

Étant donné la distribution uniforme de la lumière du soleil tout au long de la journée, il est important d'ajuster l'orientation du capteur afin d'optimiser la quantité d'énergie collectée. En général, les capteurs sont positionnés vers le sud (dans le cas de l'hémisphère nord).

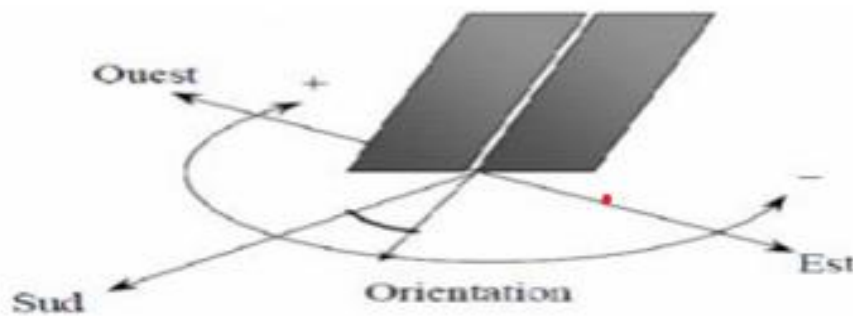


Figure I.13: *Orientation d'un capteur solaire*

- **L'inclinaison**

L'inclinaison des panneaux solaires doit être ajustée en fonction de la latitude du site afin d'améliorer la captation de l'énergie solaire tout au long de l'année et plus encore en hiver. L'angle optimal se situe souvent à peu près au niveau de la latitude du lieu.

Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli ont trouvé que la meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud. L'angle optimum d'inclinaison est appliqué à une variété de systèmes, tels que, les capteurs plans ou paraboliques, les panneaux photovoltaïques, maisons solaires et serres installées dans une position fixe. [12]

I. 3. 1. 3 Influence du l'absorbeur

Généralement fabriqué en tôle noire, son rôle principal est de capter autant de chaleur que possible pour la transférer aux autres éléments de son environnement par convection (fluide caloporteur), rayonnement (vitre) ou conduction (tube). L'absorbeur doit maximiser les contacts avec le fluide caloporteur afin d'optimiser ces échanges et de minimiser les pertes vers l'extérieur, garantissant ainsi une efficacité optimale du capteur... [13]

I. 3. 1. 4 La circulation du fluide caloporteur

Le fluide employé dans le système circulaire doit posséder une excellente conductivité thermique et être capable de résister à des températures hautes ainsi qu'au gel.

M. N. Bargach et al (2004), C. D. Ho et al (2005) , Il a été prouvé que l'augmentation du débit du fluide caloporteur améliore la puissance du capteur solaire. Pour évacuer la chaleur accumulée par la surface absorbante, on utilise généralement soit l'air, soit l'eau. [14]

I. 3. 1. 5 L'isolation

Le capteur solaire accumule de l'énergie thermique à partir du soleil. Cependant, pour maximiser cette énergie, il est essentiel d'employer un matériau hautement isolant afin de réduire au minimum les pertes vers l'extérieur.

On utilise souvent la laine de verre et les mousses polyuréthanes comme matériaux isolants. Ils ont une épaisseur qui va de 4 à 8 cm.

I. 3. 1. 6 Influence du Couche d'air

Cette conception intelligente permet de minimiser les déperditions de chaleur qui pourraient survenir entre la partie absorbante et l'isolant. En optimisant cette interface cruciale, on crée comme une barrière protectrice qui maintient la précieuse chaleur là où elle doit être - dans le système de captation...

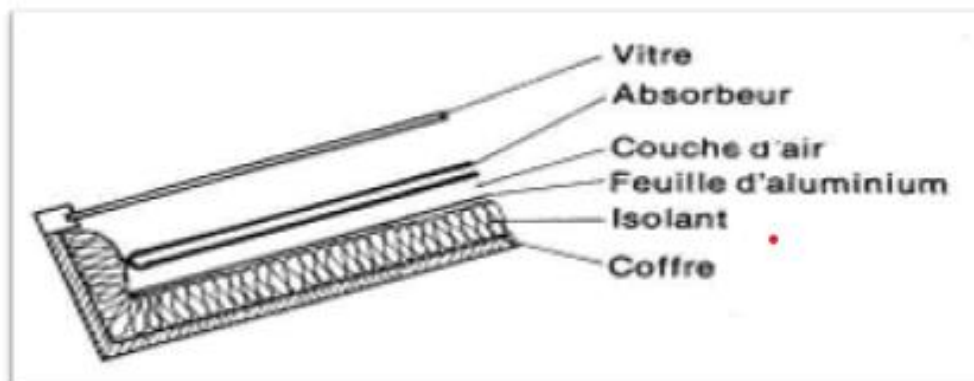


Figure I.14: La couche d'air

I. 3. 1. 7 L'épaisseur de vitre

La loi de Lambert-Bouguer fournit la valeur de cette épaisseur

$$G = G^* \exp(-\alpha_v \cdot x) \quad \text{I. 1}$$

G : facteur d'absorption du verre.

x: épaisseur de la vitre en cm.

G : intensité de rayonnement.

G* : rayonnement direct reçu au sol par ciel moyen.

Le tableau II.1 suivant illustre le lien entre l'épaisseur du verre et le rayonnement solaire total pour la région d'Alger :

Tableau I.1: *Le lien entre l'épaisseur du verre et le rayonnement solaire total pour la région d'Alger*

	G	G*	α_v	x
Janvier	3706	6328	0,07	3,31
Février	4802	7240	0,07	2,54
Mars	5560	7818	0,07	2,11
Avril	5786	7884	0,07	1,91
Mai	6182	7590	0,07	1,27
Juin	5988	7326	0,07	1,25
Juillet	6266	7274	0,07	0,92
Août	6434	7396	0,07	0,86
Septembre	6050	7364	0,07	1,21
Octobre	5006	6948	0,07	2,03
Novembre	3878	6278	0,07	2,98
Décembre	3488	5890	0,07	3,25

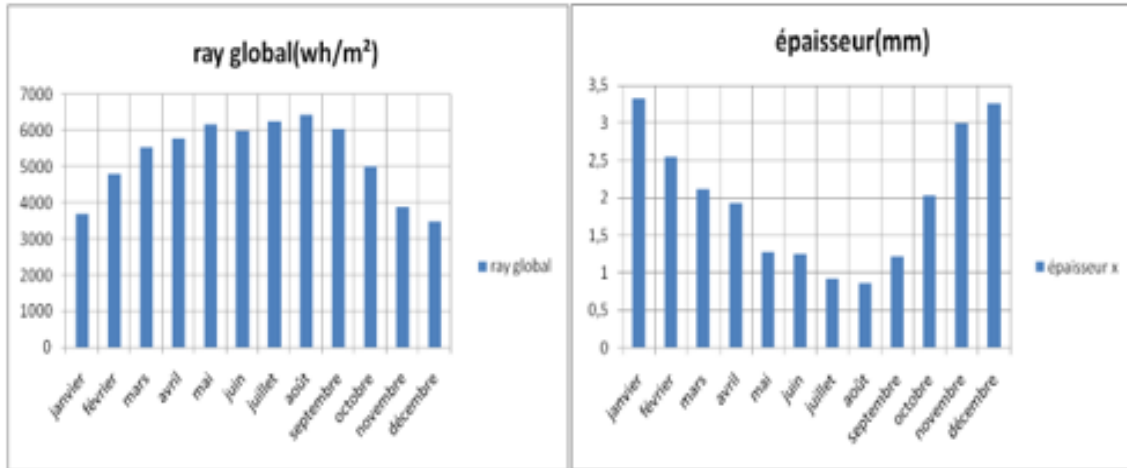


Figure I.15: illustrant la variation de l'épaisseur de la vitre

Il est observé que l'épaisseur du vitrage est proportionnellement inverse au rayonnement solaire tout au long de l'année. Étant donné que le vitrage joue un rôle crucial dans l'isolation de la face avant du capteur, nous nécessitons un vitrage d'une épaisseur d'au moins 3 mm pour combattre les pertes thermiques pendant les périodes froides. Cependant, cette exigence peut altérer la transmissivité du capteur et entraîner une augmentation de son poids. Dorénavant, les avancées technologiques obligent les fabricants à produire des capteurs de plus en plus légers.

I. 3. 1. 8 Système de stockage thermique

Le dimensionnement du ballon de stockage est une étape clé pour garantir l'efficacité du système solaire thermique. Idéalement, sa capacité doit être adaptée aux besoins quotidiens des utilisateurs – ni trop petit (pour éviter les pénuries), ni trop grand (pour limiter les déperditions inutiles). Un volume bien calculé permet de stocker juste la quantité d'eau chaude nécessaire, réduisant ainsi les pertes énergétiques tout en assurant un confort optimal.

Par ailleurs, l'isolation du ballon joue un rôle tout aussi important. Une enveloppe isolante performante (en mousse polyuréthane, laine minérale ou autre matériau haute performance)

agit comme une véritable couverture thermique, préservant la chaleur accumulée pendant de longues heures. Moins le ballon perd de calories, moins le système a besoin de puiser dans l'énergie solaire ou d'appoint, ce qui améliore son rendement global et réduit la facture énergétique.

I. 3. 2 Paramètres externes

I. 3. 2. 1 Les paramètres d'ensoleillement

- Rayonnement Solaire :

D'après F. Moukhtari et D. Semmar (1999), l'efficacité du capteur solaire est grandement affectée par la radiation solaire, et l'augmentation de la température se modifie presque proportionnellement à la radiation solaire incidente. [15]

- Position du soleil et durée d'insolation.
- L'heure de la journée et la saison
- La position géographique du lieu considéré (latitude).

I. 3. 2. 2 Vitesse du vent

La force du vent est prise en compte dans le coefficient de convection entre la vitre et l'extérieur, influençant ainsi les pertes de chaleur. C'est pour cette raison que la connaissance des données climatiques est essentielle. Quand le coefficient de transfert thermique causé par le vent atteint son niveau maximal (pour une longueur d'1 mètre d'absorbeur noir placé horizontalement), la diminution maximale de l'efficacité se produit au niveau le plus bas.

I. 3. 2. 3 Température ambiante

Le fonctionnement du capteur solaire est fortement affecté par la température ambiante. Dans une recherche expérimentale, Ru sheng Tang et ses collaborateurs (2008) ont démontré que les capteurs sont susceptibles d'être affectés par le gel durant la nuit.[16]

I.4 Aspect thermique des installations solaire thermique

I. 4. 1 Les Pertes thermiques

Les pertes thermiques sont la chaleur qui émane du système vers l'environnement peuvent avoir lieu par l'intervention des trois modes de transfert thermique : convection, conduction et rayonnement. [17]

I. 4. 1. 1 Pertes par conduction

La chaleur se dissipe par les équipements de l'installation (parois des capteurs, conduites, réservoir de stockage).

I. 4. 1. 2 Pertes par convection

La chaleur est émise à l'environnement par le mouvement de fluide, que ce soit de l'air ou de l'eau.

I. 4. 1. 3 Pertes par rayonnement

La chaleur est dispersée sous la forme de rayonnement infrarouge provenant des capteurs ou des conduits.

I. 4. 2 Les différents modes de transferts thermiques dans une capteur installation solaire

I. 4. 2. 1 La conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière [17]. La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation : [18]

$$\Phi = k . A . \text{grad } T \quad \text{I . 2}$$

Φ : flux de chaleur. [W]

K : coefficient de conductivité thermique. [W/m. K]

A : surface d'échange. [m²]

I. 4. 2. 2 La convection

La convection est un mode captivant de transfert thermique où l'énergie voyage littéralement avec la matière en mouvement. Imaginez une danse de particules qui, tout en se déplaçant, emportent avec elles leur charge de chaleur. Ce phénomène vivant et dynamique s'oppose à la conduction, où la chaleur se transmet plus statiquement. [19]

Dans la grande famille des transferts convectifs, on rencontre deux cousins aux caractères bien distincts : [19]

- a. La convection forcée : Le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc.)
- b. La convection naturelle Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton. [18]

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad \text{I.3}$$

Φ : le flux échangé par convection. [W]

h : coefficient de convection. [W/m².K]

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide. [m²]

T_p : température de la paroi solide. [K]

T_f : température du fluide. [W]

I. 4. 2. 3 Rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [20] :

$$\phi = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

I .4

ϕ : densité de flux de chaleur émis par le corps. [W]

ϵ : Émissivité thermique du matériau.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $(5,67 \cdot 10^{-8})$. [W/m² . K⁴]

T : température absolue de la corp. [W]

I. 4. 3 Efficacité thermique d'une installation solaire

I. 4. 3. 1 Rendement de capteur solaire

L'efficacité thermique des capteurs est liée à leur capacité à transformer le rayonnement solaire en chaleur utilisable. Il est affecté par :

- La température ambiante
- L'ensoleillement.
- Les pertes thermiques.

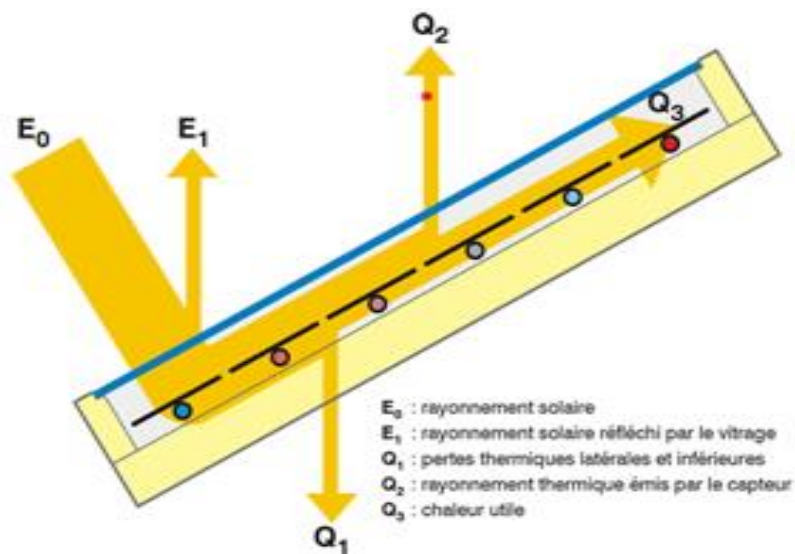


Figure I.16: Rendement thermique de capteur solaire

E0 : Rayonnement solaire.

E1 : Rayonnement solaire par le vitage.

Q1 : Pertes thermiques latérales et inférieures.

Q2 : Rayonnement thermique émis par le capteur.

Q3 : Chaleur utile.

I. 4. 3. 2 Rendement de l'installation

L'efficacité d'un capteur solaire dépend surtout de sa capacité à changer la lumière du soleil en chaleur utilisable. En termes simples, plus le capteur arrive à capter et garder la chaleur du soleil, mieux il fonctionne. Il est affecté par :

- La température ambiante.
- L'ensoleillement.
- Les pertes thermiques.

I.5 Aspect écologique dans une installation solaire thermique

L'installation solaire thermique, utilisant la chaleur du soleil (par exemple pour le réchauffement de l'eau ou des bâtiments), présente plusieurs avantages écologiques, tout en nécessitant quelques considérations sur certains points. Voici une analyse approfondie :

I. 5. 1 Aspects écologiques positifs

I. 5. 1. 1 Une ressource abondante et gratuite

Les installations solaires thermiques exploitent une ressource naturelle, gratuite et disponible partout sur la planète : le rayonnement solaire. Contrairement aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) dont les réserves s'épuisent et dont l'accès est inégalement réparti géographiquement, l'énergie du soleil offre une alternative écologique et pérenne.

I. 5. 1. 2 Réduction des émissions de gaz à effet de serre

L'énergie solaire joue un rôle crucial dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui sont largement responsables du réchauffement climatique. [21]

L'énergie solaire est une alternative propre et respectueuse de l'environnement. [21]

I. 5. 1. 3 Faible impact environnemental

Les installations solaires thermiques garantissent l'absence de production de CO₂ pendant la période de fonctionnement, donc éviter le risque de pollution de l'atmosphère.

I. 5. 1. 4 Durabilité et longévité

Parmi les atouts majeurs des installations solaires thermiques, leur extraordinaire durée de vie mérite d'être soulignée. Ces systèmes robustes peuvent fonctionner efficacement pendant un quart de siècle, voire 30 ans, avec un entretien approprié. Cette caractéristique en fait une solution particulièrement intéressante sur le plan environnemental et économique. [21]

I. 5. 2 Considérations écologiques à prendre en compte

I. 5. 2. 1 Les équipements utiliser dans les installations solaires thermiques

Les matériaux utilisés dans la fabrication des capteurs solaires thermiques, tels que le verre, l'aluminium ou le cuivre, peuvent avoir un impact environnemental important, notamment lors de leur extraction et de leur transformation (pollution, consommation d'énergie, etc.). Il est donc essentiel de privilégier les fournisseurs engagés dans des pratiques durables et d'encourager l'utilisation de matériaux recyclés afin de réduire l'empreinte écologique de ces équipements.

I. 5. 2. 2 Emploi des fluides caloporteurs

Dans les installations solaires thermiques, un fluide caloporteur est utilisé pour transférer la chaleur captée par les capteurs solaires vers le système de stockage. Toutefois, certains de ces fluides peuvent être polluants en cas de fuite. Il est donc essentiel de privilégier des

solutions plus respectueuses de l'environnement, comme l'utilisation d'eau pure, et de veiller à un entretien régulier du système pour prévenir tout risque de pollution.

I. 5. 2. 3 Recyclage du système en fin de vie

Le recyclage des panneaux solaires thermiques est un enjeu majeur pour l'industrie de l'énergie solaire et pour la protection de l'environnement. Aujourd'hui, ce n'est plus un problème car Les usines de retraitement existent et permettent de recycler des panneaux thermiques à plus de 95%.

5Ces matériaux peuvent ensuite être réutilisés dans la production de nouveaux panneaux solaires ou d'autres produits, contribuant ainsi à l'économie circulaire. [21]

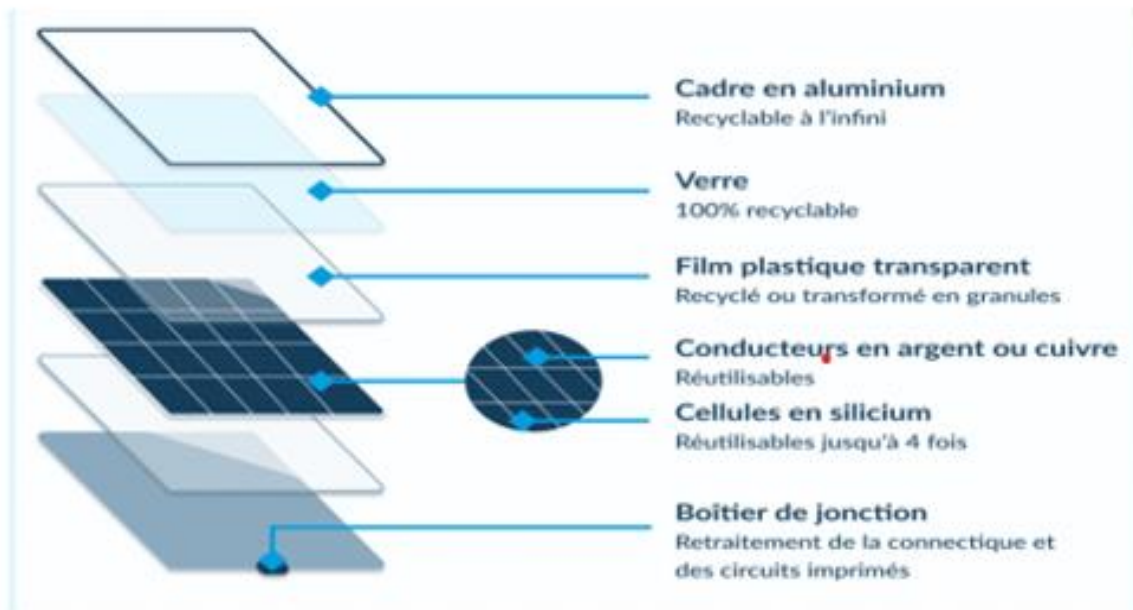


Figure I.17: Composition d'un panneau solaire : tout se recycle

I.6 Aspect économique des installations solaire thermique

Lors de l'analyse de la faisabilité des systèmes solaires thermiques, l'aspect économique constitue un facteur déterminant. Cette évaluation porte sur les coûts d'investissement, les bénéfices financiers à long terme ainsi que les aides et incitations disponibles pour encourager l'adoption de ces technologies :

I. 6. 1 Coûts des systèmes solaires thermiques

Les coûts d'une installation solaire thermique varient en fonction de plusieurs facteurs, notamment la taille du système, la technologie utilisée et la complexité de l'installation. En Algérie, pour une maison individuelle composée d'un foyer de quatre personnes, le coût moyen d'un chauffe-eau solaire individuel (CESI) équipé de 2 à 4 m² de capteurs et d'un ballon de stockage de 150 à 300 litres se situe généralement entre 300 000 et 600 000 DZD.

Le tableau récapitule les postes de dépense typiques :

Tableau I.2: Les postes de dépense typiques

Eléments	Coût estimé (DZD)
Capteurs solaires thermiques	120 000 à 250 000
Ballon de stockage	80 000 à 180 000
Régulation, Pompe, Accessoires	50 000 à 100 000
Installation, main d'œuvre	50 000 à 70 000
Total estimé	300 000 à 600 000

Les facteurs majeurs qui impactent le coût comprennent :

- La nature des capteurs (plans, sous vide, etc.).
- Le réservoir de stockage ainsi que les équipements associés (tels que la pompe, le régulateur, etc.).
- La superficie des capteurs photovoltaïques.
- L'installation nécessite une main-d'œuvre. [22]

I. 6. 2 Bénéfices financiers :

Les systèmes solaires thermiques permettent de réduire significativement les dépenses liées à l'énergie :

- Réduction des coûts de chauffage et d'eau chaude : l'énergie solaire peut couvrir entre 60 % et 80 % des besoins en eau chaude sanitaire d'un foyer.
- Autonomie énergétique accrue : ces systèmes diminuent la dépendance aux énergies fossiles (gaz, pétrole) et protègent ainsi contre les fluctuations de leurs prix. [23]

I. 6. 3 Coûts d'exploitation et d'entretien

L'un des principaux avantages d'un système solaire thermique réside dans son faible coût de fonctionnement. Une fois installé, ce type de système nécessite très peu d'entretien. Les opérations courantes comprennent :

- La vérification annuelle du fluide caloporteur,
- Le nettoyage des capteurs solaires (généralement 1 à 2 fois par an),
- Le contrôle du système de régulation.

Le coût moyen annuel de l'entretien est estimé entre 20 000 et 40 000 DZD. De plus, la durée de vie moyenne d'un système solaire thermique est comprise entre 20 et 25 ans, ce qui contribue à améliorer sa rentabilité sur le long terme. [24]

I. 6. 4 Rentabilité et retour sur investissement

En Algérie, une famille dépense en moyenne entre 5 000 et 10 000 DZD par 3 mois pour la production d'eau chaude sanitaire, que ce soit par le biais du gaz naturel ou de l'électricité. Une installation solaire thermique bien dimensionnée peut couvrir entre 60 % et 80 % des besoins annuels en eau chaude, en fonction de la région et du niveau d'ensoleillement.

Cela se traduit par une économie annuelle estimée entre 20 000 et 40 000 DZD. Ainsi, le temps de retour sur investissement varie généralement entre 5 et 10 ans, ce qui rend ce type de solution compétitif par rapport à d'autres technologies énergétiques. [25]

Durabilité : La durée de vie moyenne d'un système solaire thermique est estimée entre 20 et 30 ans, ce qui en fait une solution énergétique fiable sur le long terme.

Délai de rentabilité : Il est généralement compris entre 8 et 15 ans, en fonction de plusieurs facteurs tels que le niveau d'ensoleillement, les subventions disponibles et les économies réalisées sur les factures énergétiques.

Rentabilité : Elle est particulièrement optimisée dans les régions fortement ensoleillées, et lorsque le système est exploité au maximum de ses capacités, notamment pour la production d'eau chaude sanitaire combinée au chauffage des locaux. [23]

I. 6. 5 Mise en comparaison avec d'autres technologies

Solaire thermique par rapport au solaire photovoltaïque : Le solaire thermique est plus efficace pour produire de l'eau chaude, mais il est moins polyvalent que le solaire photovoltaïque, qui permet de générer de l'électricité.

Comparaison avec la chaudière classique : bien que le coût initial soit plus élevé, le solaire thermique réduit les coûts de fonctionnement sur le long terme.[23]

I.7 Conclusion

En conclusion, Une installation solaire thermique représente une alternative propre et respectueuse de l'environnement pour générer de la chaleur. Nous permettons de réduire des émissions de gaz à effet de serre, à condition que les équipements utilisés sont des matériaux recyclés et bien installés pour maximiser ses bénéfices environnementaux.

Chapitre II Modélisation d'une installation solaire thermique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons faire une explication en détails les différents composants qui constitutifs d'une installation solaire thermique et analyse leur fonctionnement. Parmi ces composants, on retrouve notamment les capteurs solaires, le circuit hydraulique, les échangeurs thermiques, le ballon de stockage ainsi que les dispositifs de régulation et de sécurité.

Par allieur, une évaluation des performances globales du système est effectuée par le biais de généralisation des grandeur clés, telles que la puissance thermique utile, les pertes d'énergie, le rendement instantané et annuel, et les paramètres affectant l'efficacité totale de l'installation. Ces considérations permettent de juger la pertinence technique et économique d'un tel système dans des conditions climatiques et d'utilisation variables.

II.2 Différents composants d'une installation solaire thermique

II. 2. 1 Les capteurs

II. 2. 1. 1 Définition d'un capteur solaire thermique

Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour transformer l'énergie du soleil en chaleur. Il capte le rayonnement solaire à l'aide d'une surface absorbante, puis transmet cette chaleur à un fluide caloporteur (comme de l'eau ou un liquide antigel) qui circule à l'intérieur. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire, du chauffage ou encore pour alimenter certains procédés industriels.

II. 2. 1. 2 Les types du capteur solaire thermique

Dans une installation solaire thermique, le choix du capteur est essentiel car il détermine le rendement, l'efficacité et l'usage du système. On distingue plusieurs types de capteurs thermiques, chacun adapté à des besoins spécifiques :

II. 2. 1. 2. 1 Le capteur plan vitré

Le capteur le plus couramment utilisé est le capteur plan vitré. Il se compose d'un caisson isolé surmonté d'une vitre. À l'intérieur, des absorbeurs noirs captent l'énergie solaire. Un fluide caloporteur circule dans des tuyaux en contact avec ces absorbeurs pour récupérer la chaleur du soleil. La vitre en façade et l'isolant limitent les pertes thermiques. De plus, l'absorbeur peut être recouvert d'un revêtement sélectif, qui réduit le rayonnement vers l'extérieur et améliore ainsi le rendement du capteur.[26]

Un capteur plan vitré est composé

- D'un caisson.
- D'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords.
- D'un film réfléchissant.
- D'un faisceau de tubes cylindriques.
- Une surface absorbante placée à l'intérieur du coffre.
- Un Vitrage fixé sur le caisson.[26]



Figure II.1: Capteur plan vitré

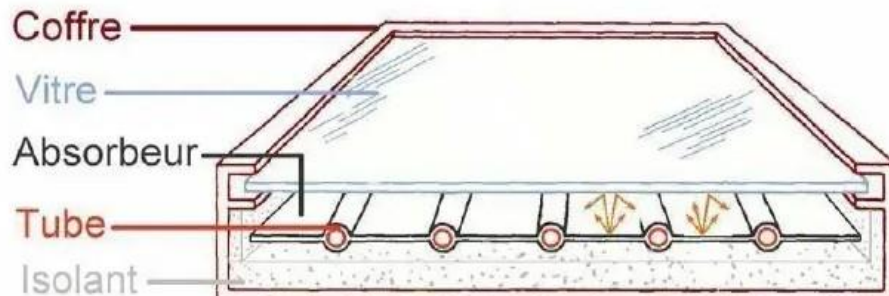


Figure II.2: Schéma des composants de capteur plan vitre

II. 2. 1. 2. 2 Le capteur sous vide

Les capteurs à tubes sous vide constituent une avancée significative dans le domaine du solaire thermique. Leur principe de fonctionnement repose sur un mécanisme similaire à celui des bouteilles isothermes : un vide est créé entre deux parois de verre, formant ainsi une barrière efficace contre les pertes thermiques.

Ce vide agit en supprimant quasiment tout transfert de chaleur par convection et conduction entre la surface absorbante interne et l'enveloppe externe du tube. Ainsi, la chaleur captée est mieux conservée, ce qui améliore considérablement le rendement du système, notamment en conditions de basses températures ambiantes.

L'efficacité énergétique de ces capteurs dépend essentiellement de l'intensité du vide présent dans les tubes. Plus la pression interne est faible (bien inférieure à la pression atmosphérique), plus l'isolation thermique est performante. Cela permet de réduire les déperditions de chaleur et de maximiser l'énergie transférée au fluide caloporteur, utilisée ensuite dans le chauffe-eau solaire.

Ce dispositif permet donc de maintenir une température plus élevée du fluide, même en hiver ou par temps nuageux, ce qui en fait une solution particulièrement adaptée aux environnements à fort contraste thermique.[26]



Figure II.3: *Capteur sous vide*

Il existe plusieurs types de ce type des capteurs :

II. 2. 1. 2. 2. a Les tubes sous vide à flux direct

Dans ce type de système, le fluide caloporteur circule directement à travers l'absorbeur situé à l'intérieur des tubes sous vide, ce qui permet un transfert thermique très efficace et donc un rendement élevé. De plus, l'absorbeur peut être orienté lors de l'installation pour optimiser la captation solaire, ce qui en fait une solution idéale pour les installations en façade.

Un autre avantage des capteurs à flux direct par rapport aux modèles classiques est leur possibilité d'installation sur des toitures terrasses, à condition que la région soit peu

exposée à la neige. Cela permet de réduire considérablement les coûts liés aux structures de fixation.[26]

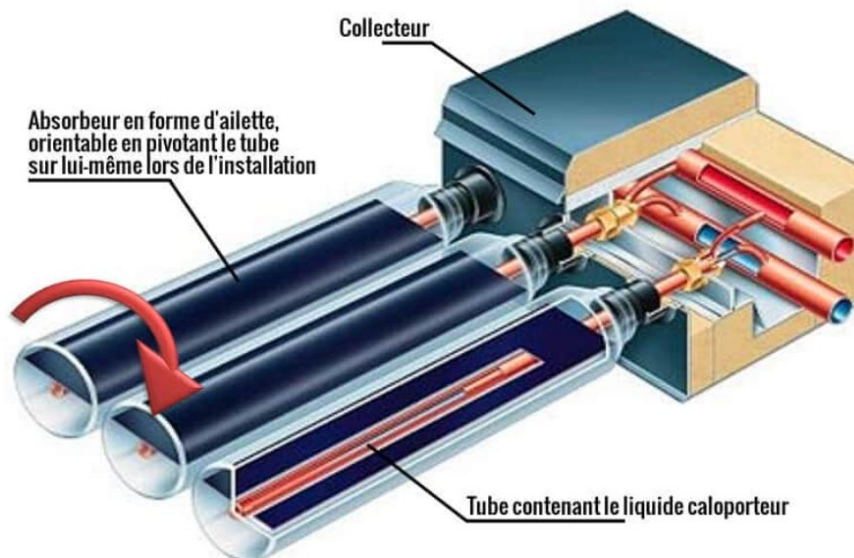


Figure II.4: *Captteur sous vide a flux direct*

II. 2. 1. 2. 2. b Les tubes sous vide à caloduc

Dans les capteurs à tubes sous vide avec caloduc, l'absorbeur contient une petite quantité d'eau ou de liquide antigel, en fonction des exigences de température. Ce liquide, placé sous vide partiel, s'évapore en chauffant, puis la vapeur monte à l'intérieur du tube jusqu'au condenseur. Là, elle se condense et retourne sous forme liquide dans l'absorbeur, bouclant ainsi le cycle. La chaleur générée est transmise au fluide caloporteur via le condenseur, assurant un transfert thermique efficace.

Ce système nécessite une inclinaison minimale du tube absorbeur, contrairement aux capteurs à flux direct. Les fabricants recommandent généralement une pente de 20 à 30° pour l'installation des capteurs solaires, une configuration qui convient à la majorité des toitures en France.

Lorsque la température du condenseur dépasse celle d'évaporation du fluide dans le caloduc, une vaporisation complète peut se produire. Cela peut arriver en période de stagnation, notamment lorsque la consommation de chaleur est insuffisante. Dans ce cas, aucun transfert de chaleur n'a lieu vers le fluide caloporteur, ce qui peut constituer un avantage pour les systèmes fréquemment exposés à de courtes phases de stagnation. Toutefois, la température de fonctionnement potentielle de ces capteurs est généralement inférieure à celle des capteurs à flux direct, en raison de l'étape supplémentaire de transfert thermique entre le condenseur et le fluide caloporteur. [26]

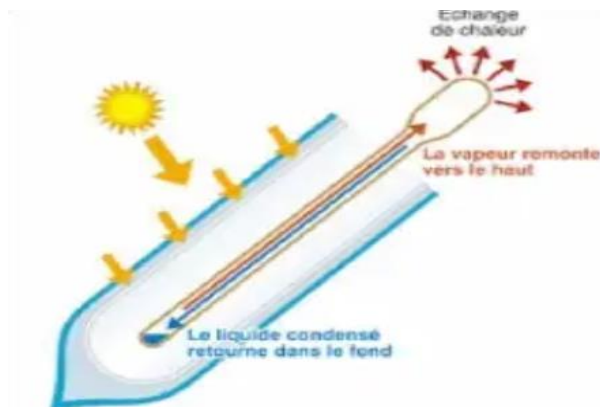


Figure II.5: *Capteur sous vide a caloduc*

II. 2. 1. 2. 3 Le capteur non vitré (Capteur moquette)

Ce capteur thermique se compose simplement d'un ensemble de tubes noirs disposés côte à côte. Ces tubes sont généralement fabriqués en Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM), un caoutchouc souple très résistant aux UV et au gel. En l'absence de vitrage, les performances de ce type de capteur sont fortement influencées par la température extérieure. Il est donc particulièrement efficace pour le chauffage des piscines en été, lorsque la température souhaitée de l'eau est proche de celle de l'air ambiant. En général, la surface des capteurs représente entre un tiers et deux tiers de celle du bassin.[26]

En l'absence de vitrage, ils captent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, cette absence d'isolation entraîne d'importantes pertes de chaleur, surtout en cas de vent ou lorsque la température extérieure est basse. Lorsqu'ils sont exposés à de l'air chaud brassé par le vent, ces capteurs absorbent la chaleur échangée, notamment pendant la nuit si la température reste élevée à l'extérieur. [27]



Figure II.6: *Capteur non-vitré*

II. 2. 1. 2. 4 Les capteurs à concentration

II. 2. 1. 2. 4. a Capteurs cylindro-paraboliques

La surface réfléchissante d'un concentrateur cylindro-parabolique est formée d'un cylindre dont la section est une parabole. Bien orienté vers le soleil, ce type de concentrateur focalise le rayonnement solaire direct sur une ligne focale où se situe le récepteur (voir figure 7). Le suivi du soleil s'effectue selon un seul axe, ce qui simplifie le mécanisme de poursuite. Ces concentrateurs peuvent être orientés selon l'axe Est-Ouest ou Nord-Sud. L'orientation Nord-Sud est plus avantageuse en été, car elle permet de capter davantage d'énergie solaire,

tandis que l'orientation Est-Ouest assure généralement une collecte plus régulière sur l'ensemble de la journée.

Les températures de fonctionnement atteignent généralement entre 270 °C et 450 °C, avec un rendement de conversion avoisinant les 70 % en régime nominal. Dans la pratique, l'angle d'ouverture de ces capteurs est généralement compris entre 20° et 30°. Cette technologie est aujourd'hui la plus utilisée dans les centrales solaires thermodynamiques.[28]

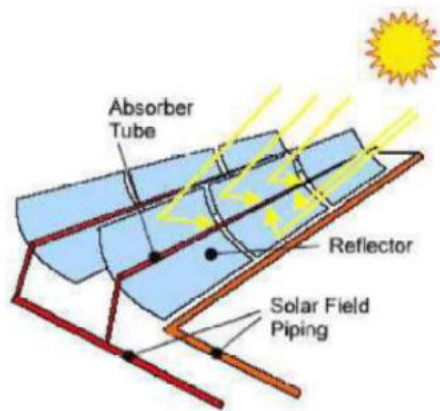


Figure II.7: *Capteur cylindro-paraboliques*

II. 2. 1. 2. 4. b Les capteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel (LFR)

Les concentrateurs à réflecteurs de Fresnel linéaires (LFR) sont constitués de miroirs plans ou légèrement courbés, disposés en lames parallèles. Ces miroirs peuvent être inclinés autour d'un axe afin de réfléchir et concentrer les rayons solaires sur une ligne focale fixe où est placé le récepteur (II-8).

Comparés aux capteurs cylindro-paraboliques (PTC), les LFR présentent plusieurs avantages : leur fabrication est plus simple, le système de suivi solaire nécessite des moteurs de plus petite taille, et l'installation du champ solaire est facilitée. De plus, leur

conception permet de couvrir jusqu'à 70 % de la surface au sol avec des miroirs, optimisant ainsi l'utilisation de l'espace.

Cependant, ces concentrateurs présentent une performance optique inférieure : elle est réduite de 30 à 40 % par rapport à celle des PTC. [28]



Figure II.8: *Concentrateur à réflecteur linéaire de Fresnel*

II. 2. 1. 2. 4. c Les capteurs paraboliques

Ces concentrateurs ponctuels se caractérisent par une symétrie de révolution parabolique. Les rayons solaires, une fois réfléchis par la parabole, convergent vers un point focal unique. L'orientation de ces systèmes s'effectue à l'aide de montures mobiles sur deux axes, tels que la monture Alt azimutale ou équatoriale. Ce suivi solaire bi axial constitue cependant l'un des principaux inconvénients de cette technologie, en raison de sa complexité mécanique. [28]

La configuration la plus courante de ce type de concentrateur est le système Dish-Stirling, qui associe une parabole à un moteur Stirling. Il s'agit de la technologie la plus utilisée

pour la production d'électricité à faible puissance par conversion thermodynamique de l'énergie solaire.

Les capteurs de ces systèmes présentent des rendements proches de 75 %, avec des puissances thermiques allant de 1 à 100 kW th. Grâce à des taux de concentration élevés, de l'ordre de 6000 à 10 000, les températures de fonctionnement peuvent atteindre 600 °C à 1200 °C. Le rendement instantané de conversion de l'énergie solaire en électricité dépasse 22 %, atteignant jusqu'à 29 % pour certains modules comme celui de 25 kW développé par Stirling Energy System (SES). Toutefois, les coûts d'exploitation et de maintenance restent relativement élevés, limitant ainsi leur diffusion à grande échelle. [28]

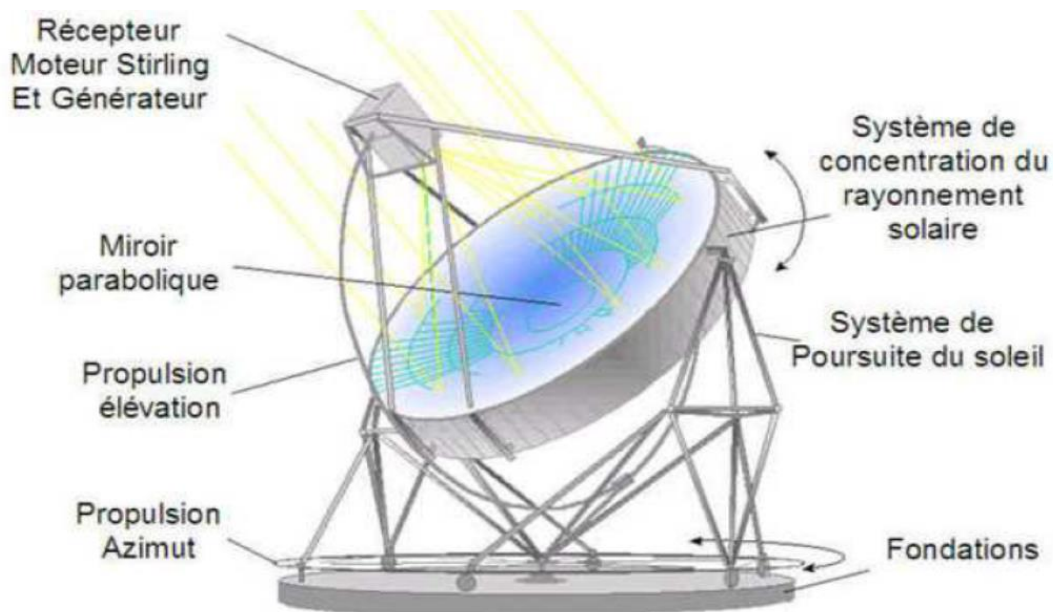


Figure II.9: Concentrateur parabolique avec un moteur Stirling

II. 2. 1. 2. 4. d Les Centrales à tour

Cette centrale utilise des héliostats qui sont constitués de miroirs plans. Les héliostats concentrent les rayons solaires vers un récepteur ponctuel situé au sommet d'une tour. Le suivi par les héliostats se fait suivant deux axes : l'axe EST-OUEST et l'axe NORD-SUD. Les fluides caloporteurs couramment utilisés sont : l'eau, et le sel fondu. Le facteur de concentration varie de 300 à 1000, ce qui entraîne une variation de la température de 550°C à 1000° C. [29]



Figure II.10: centrale à tour (les héliostats)

II. 2. 1. 3 Les composants d'un capteur plan :

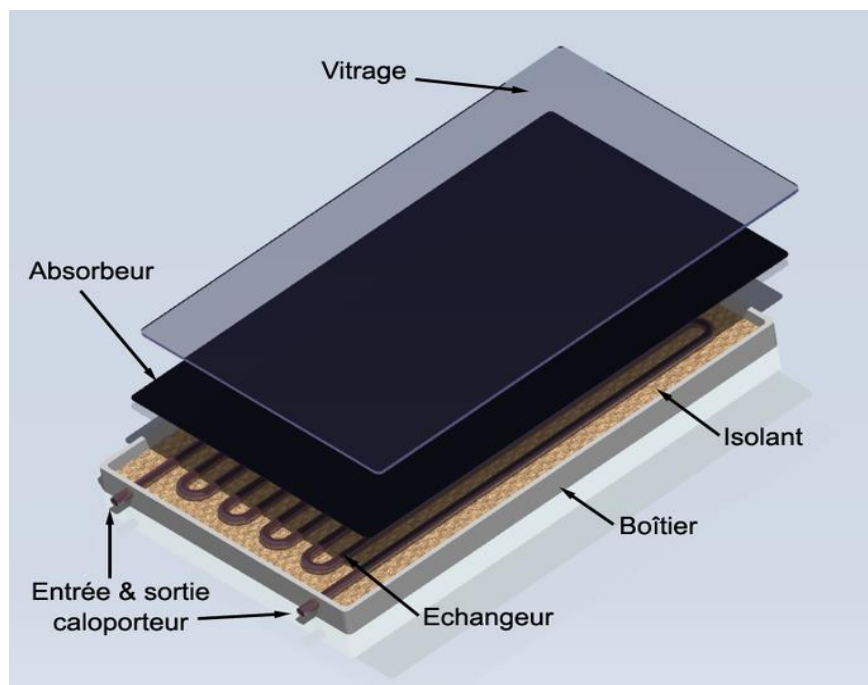


Figure II.11: Les différents composants d'un capteur plan

II. 2. 1. 3. 1 Vitrage

Il s'agit d'une surface constituée d'un matériau transparent à la lumière visible mais opaque au rayonnement infrarouge, ce qui permet de créer un effet de serre. La plupart des couvertures transparentes courantes sont en verre ordinaire ou traité, permettant le passage de jusqu'à 95% de la lumière grâce à leur faible teneur en oxyde de fer.

L'emploi de la couverture transparent sur le capteur optimise son efficacité et garantit des températures dépassant les 70°C, en générant un effet de serre qui minimise les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, ceci dit : Considérons un capteur soumis à la lumière solaire, dont la couverture est transparente au rayonnement visible mais opaque aux rayonnements U.V et I.R. à la surface terrestre . , Le rayonnement solaire se compose de

42% de lumière visible qui sera transmise à l'absorbeur. Cet absorbeur, en se réchauffant, émettra du rayonnement infrarouge qui ne pourra pas s'échapper complètement. Une partie sera absorbée par la vitre, provoquant sa chaleur, et une autre partie sera réfléchiée vers la plaque qui, elle aussi, se réchauffe, L'utilisation de la couverture transparente prévient le refroidissement de l'absorbeur dû au vent.[30]

Le vitrage est généralement un peu structuré, ce qui disperse la partie réfléchiée de la lumière solaire incidente et réduit ainsi le risque d'éblouissement. Les attributs fondamentaux d'un vitrage sont : Le coefficient de de transmission (η). L'émissivité (ϵ).[31]

Les propriétés de divers types de verre sont données au tableau II-1 :

Tableau II.1: *Quelques caractéristiques optiques des verres [30]*

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre Réflexion			
Absorption	8%	9%	83%
Verre basse teneur en Fe 2 O3	8%	2%	90%

Le vitrage ne capte que faiblement le rayonnement solaire, donc il transmet un maximum d'énergie vers l'absorbeur. Le verre prisme est actuellement le type de verre le plus couramment utilisé pour les capteurs solaires plans. Il se distingue en réduisant la portion du rayonnement réfléchi (1,5 %). Contrairement au verre classique trompé. Ce verre peut obtenir une transmission allant jusqu'à 96% lorsque l'angle d'incidence est faible. [32]

II. 2. 1. 3. 2 Absorbeur

Assure trois rôles : capter le rayonnement solaire, convertir ce rayonnement en chaleur et diffuser cette chaleur au fluide caloporteur. L'éclairement de l'absorbeur dépend de l'inclinaison du capteur par rapport au soleil. Il est donc nécessaire de le positionner pour qu'il bénéficie d'une rayonnement solaire optimale.[33]

On distingue plusieurs modes de construction [34] :

- ✓ L'absorbeur à ailettes
- ✓ L'absorbeur à coussin
- ✓ L'absorbeur « Roll bond »

Au tableau II-2 est donné les caractéristiques de divers métaux peuvent être utilisés comme absorbeur : [34]

Tableau II.2:Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

Matière	Conductivité (w/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	240	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Afin de réduire les pertes dues au rayonnement, il est courant que les absorbeurs soient recouverts d'une Couche sélective. Pour la majorité des capteurs, le revêtement sélectif est réalisé à partir de nickel et de chrome. Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au tableau II-3 :[34]

Tableau II.3:Revêtements des surfaces d'absorbeur

Revêtement	Absorption	Emission
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Inox (sélectif)	0,95	0,05

II. 2. 1. 3. 3 L'isolation thermique

L'absorbeur a pour rôle de transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur tout en réduisant au maximum les pertes thermiques par conduction, convection et rayonnement, qui se produisent depuis les différentes parties périphériques vers l'extérieur. Voici les solutions adaptées :

La partie avant de l'absorbeur présente une lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur, agissant comme un isolant contre la transmission de chaleur par conduction. Toutefois, si l'épaisseur de cette lame est trop importante, une convection naturelle se forme, entraînant une perte d'énergie. Pour les températures de fonctionnement habituelles du capteur plan, l'épaisseur optimale de la lame d'air est de 2,5 cm. En installant deux vitres, on réduit les pertes liées à la réémission, ainsi que celles dues à la conduction et à la convection.[35]

Pour réduire les pertes thermiques au niveau de la périphérie du capteur, il est possible d'ajouter une ou plusieurs couches d'isolant qui doivent être capables de supporter des

températures élevées sans dégazer. Dans le cas contraire, des dépôts peuvent apparaître sur la face intérieure de la couverture. En plus de l'utilisation de l'isolant pour limiter les pertes thermiques, il est aussi important d'améliorer la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le caisson, en évitant de trop comprimer ces surfaces les unes contre les autres. En effet, en présence d'une rugosité importante, un film d'air peut se former entre les faces en contact, ce qui empêche la chaleur de se transférer facilement par conduction.[35]

II. 2. 1. 3. 4 Le cadre

Le cadre, généralement en aluminium ou en bois, enveloppe l'absorbeur et assure l'isolation thermique du capteur, offrant ainsi une protection contre l'humidité et les dommages mécaniques. [20]

II. 2. 2 Ballon de stockage

Un ballon de stockage est un réservoir conçu pour accumuler de l'eau chaude ou de l'eau glacée, selon qu'il est utilisé dans un système de chauffage ou de climatisation. Dans le cas d'un ballon d'eau chaude, il sert de tampon énergétique, permettant à la fois d'alimenter un circuit de chauffage et de fournir de l'eau chaude sanitaire (ECS). [36]

Il sert à emmagasiner l'eau chaude afin de la restituer lorsqu'elle est nécessaire à l'usage. Par ailleurs, pour limiter les pertes de chaleur vers l'extérieur, le ballon de stockage doit être correctement isolé, en choisissant une épaisseur d'isolant thermique adaptée à la fois sur le plan technique et économique.



Figure II.12: *Ballon de stockage*

II. 2. 3 Pompe de Circulateur

Le circulateur de chaudière est une pièce essentielle d'un système de chauffage central à eau chaude. Il permet de faire circuler le fluide caloporteur et de maintenir une pression adéquate dans le circuit de chauffage.

II. 2. 4 Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur est un liquide spécifique qui circule dans les capteurs solaires thermiques, absorbant l'énergie calorifique du rayonnement solaire et la transporter vers un échangeur thermique, où cette énergie est transférée au circuit d'eau chaude sanitaire.[37]

Pour dissiper la chaleur accumulée par la surface absorbante ,on utilise généralement soit l'air ou à l'eau .on utilise également des mélanges d'eau et glycol en raison des conditions climatiques ,ces derniers possédant une capacité calorifique spécifique inférieure à celle de l'eau pure .Contrairement à l'eau ,l'air ne connaît pas de problèmes de congélation en hiver ou d'ébullitions été et il y'a pas de souci de corrosion .Cependant ,l'air ne peut

être utilisé que pour le chauffage des espaces et les transferts de chaleur sont moins efficaces qu'avec l'eau .[38]

II. 2. 5 La tuyauterie

La tuyauterie joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement d'un système solaire thermique. Il s'agit de faire circuler un fluide (liquide ou gaz) d'un équipement (comme un échangeur thermique) vers un autre, ou d'un appareil vers une unité de stockage (réservoir ou cuve) ; ou encore d'un réservoir vers un équipement lors de processus de production, de transformation ou de stockage d'un produit.[39]

On identifie généralement deux catégories principales de tuyauteries : [39]

- Les Tuyauteries Aériennes.
- Les Tuyauteries Enterres.

II. 2. 6 Vase expansion

Le vase d'expansion est un composant essentiel au bon fonctionnement d'un système de chauffage central. Il sert à réguler la pression dans le circuit hydraulique. Installé du côté aspiration de la pompe de circulation, il a pour rôle d'absorber les variations de volume et de recueillir l'intégralité du fluide caloporteur expulsé par les capteurs en cas de surchauffe. [40]



Figure II.13: *Le vase d'expansion dans une installation solaire à thermosiphon*

II. 2. 7 Purgeur

Le purgeur d'une installation est un dispositif manuel ou automatique en général placé en son point le plus haut et permettant d'éliminer l'air en partie haute du circuit lors du remplissage et des entretiens. [40]



Figure II.14 : *Purgeur*

II. 2. 8 L'échangeur thermique

L'échangeur thermique est un composant fondamental dans les systèmes de chauffage, climatisation et réfrigération. Il permet d'assurer le transfert de chaleur entre deux fluides, tout en évitant leur mélange, grâce à une paroi hautement conductrice. Il existe différents types d'échangeurs thermiques, utilisés dans différents domaines.[41]

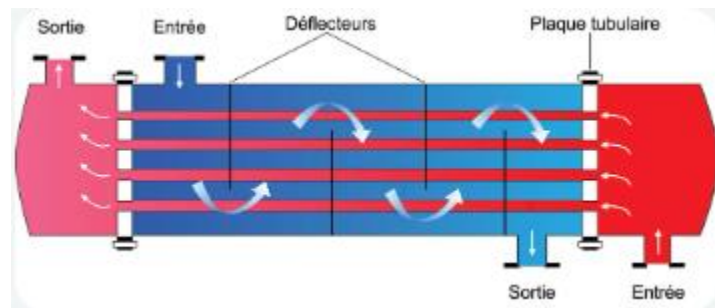


Figure II.15:L'échangeur thermique

II. 2. 9 Groupe de surécrite

Le groupe de sécurité est un dispositif essentiel conçu pour limiter la pression interne d'un chauffe-eau à un maximum de 7 bars. Il a pour rôle de contrôler cette pression et de libérer un peu d'eau lorsque celle-ci augmente à cause de la dilatation due à la montée en température. En général, environ 3 % du volume total du ballon est évacué. En chauffant, l'eau se dilate, ce qui entraîne une hausse de pression à l'intérieur du réservoir. Sans ce mécanisme de sécurité, le chauffe-eau pourrait fuir, notamment au niveau des soudures qui ne résisteraient pas à une pression trop élevée.

Le groupe de sécurité assure plusieurs fonctions essentielles dans le fonctionnement d'un chauffe-eau :

- Il agit comme une soupape de sécurité en s'ouvrant automatiquement lorsque la pression dépasse la limite maximale autorisée, afin de prévenir tout risque de surpression. En général, l'eau évacuée quotidiennement ne dépasse pas 3 % du volume total de la cuve.
- Il permet également de couper l'arrivée d'eau froide grâce à un robinet d'arrêt intégré.
- Enfin, il sert à vidanger le ballon via une soupape dédiée à cet effet. [26]

II. 2. 10 Clapet anti retour

Un clapet antiretour est un appareil placé sur une canalisation qui sert à réguler le sens de l'écoulement d'un fluide. Il permet au fluide (qu'il s'agisse d'un liquide, d'un gaz ou d'air comprimé) de circuler uniquement dans une direction, tout en empêchant tout retour en arrière du flux. [26]



Figure II.16: *Claper anti retour*

II.3 Etude thermique d'une installation de chauffage solaire

II.3.1 Bilan énergétique du capteur

Soit Q_{sa} l'énergie solaire captée par un panneau solaire. Une partie de cette énergie est transmise au fluide caloporteur, formant ainsi l'énergie utile Q_u . Cette énergie peut être utilisée immédiatement ou dirigée vers un dispositif de stockage, tel qu'un réservoir d'eau chaude. Cependant, le capteur solaire subit également des pertes thermiques. Une partie de l'énergie absorbée est perdue vers l'extérieur, principalement sous forme de chaleur due à la convection et au rayonnement. Ces pertes sont notées Q_p . De plus, lors d'une phase de montée en température du système (par exemple au démarrage), il est nécessaire de considérer l'énergie absorbée par le capteur pour atteindre cette température. Cette énergie, désignée par Q_{st} , est liée à l'inertie thermique de l'installation. Ainsi, le bilan thermique global se formule comme suit [38] :

$$\phi_{sa} = \phi_{p \rightarrow} + \phi_u + \phi_{st} \quad \text{II.1}$$

ϕ_{sa} : Flux solaire absorbé

$\phi_{p \rightarrow}$: Flux perdu par la paroi absorbante

ϕ_u : Flux utile transmis au fluide caloporteur

ϕ_{st} : Flux stocké dans le capteur qui s'écrit

$$\phi_{st} = M_e C_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{II.2}$$

M_e : Masse en eau du capteur définie par : $\sum m_i c_i = M_e C_{eau}$

i : représentant les différents éléments constitutifs du capteur

C_{eau} : la capacité thermique massique de l'eau

T : Température moyenne du capteur

t : Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\Phi_{s \rightarrow p} = \tau_{CS} \alpha_{PS} G_{(i,y)}^* \quad \text{II.3}$$

τ_{CS} : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire

α_{PS} : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire

$G_{(i,y)}^*$: : Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur (W. m^{-2})

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit :

$$\phi_{sa} = q_{cf} (T_{fs} - T_{fe}) \quad \text{II.4}$$

q_{cf} : Débit calorifique du fluide caloporteur ($\text{W.}^\circ\text{C}^{-1}$) = débit massique x capacité calorifique

T_{fs} : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

T_{fe} : Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\phi_p = h_p (T_{pm} - T_a) S \quad \text{II.5}$$

h_p : Coefficient global de pertes du capteur

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante

T_a : Température de l'air extérieur

S : Surface de la paroi absorbante.

II. 3. 2 Bilan énergétique des sous-systèmes

a. Sous Système de captage solaire :

L'énergie utile Q_u délivrer par un capteur solaire plan de surface A_C (on négligeant les effets transitoires) est donnée par l'équation [W]

$$Q_u = A_C [I_c \eta_0 - U * (T_{pm} - T_a)] \quad \text{II.6}$$

Où :

I_c : Intensité des radiations solaires dans le plan du capteur.

η_0 : Efficacité optique du capteur, c'est le produit de la transparence du couvert (vitrage) par l'absorptance de l'absorbeur. (Rendement optique)

U : Coefficient global de perte thermique du capteur.

T_{pm} : Température moyenne de l'absorbeur.

T_a : Température ambiante.

b. Sous Système de stockage:

$$q_r = M_r C_r \frac{dT_r}{dt} = m_f (T_{2f} - T_{1f}) - Q_R - Q_U \quad \text{II.7}$$

$$Q_r = A_r h (T_r - T_a) \quad \text{II.8}$$

$$Q_u = m_u C (T_u - T_{ap}) \quad \text{II.9}$$

q_r : Chaleur stockée dans le réservoir.

T_r : Température de réservoir.

T_{ap} : Température d'appoint.

T_u : Température utile.

A_r : Surface du réservoir.

Q_u : Chaleur utilisé.

Q_r : Chaleur convective de réservoir vers l'ambient.

h : Coefficient de convection.

T_a : Température ambiante.

T_{2f} : Température de sortie du réservoir.

T_{1f} : Température d'entrée de réservoir.

m_f : Debit du fluide.

II. 3. 3 Énergie délivrée par les capteurs solaires

$$Q_{\text{capteurs}} = A \cdot G \cdot \eta_{\text{capteur}} \quad \text{II. 10}$$

A : surface des capteurs (en m^2)

G : irradiation globale sur la surface du capteur (en kWh/m^2)

η_{capteur} : rendement global du capteur

II. 3. 4 Rendement instantané du capteur (rendement optique réel) :

$$\eta_{\text{capteur}} = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right)^2 \quad \text{II. 11}$$

η_0 : rendement optique du capteur

a_1, a_2 : coefficients de pertes thermiques

T_m : température moyenne du fluide dans le capteur (°C)

T_a : température ambiante (°C)

Chapitre 1 G : irradiation solaire (W/m^2)

II. 3. 5 Énergie transmise au circuit (bilan thermique)

$$Q_{\text{circuit}} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{II. 12}$$

\dot{m} : débit massique du fluide (kg/s)

C_p : capacité calorifique spécifique du fluide (kJ/kg·K)

ΔT : différence de température entrée/sortie (K ou °C)

II. 3. 6 Énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS)

$$Q_{\text{ECS}} = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot (T_{\text{sortie}} - T_{\text{entrée}}) \quad \text{II. 13}$$

ρ : masse volumique de l'eau (en kg/m^3)

V : volume d'eau chauffé (en m^3)

C_p : capacité calorifique de l'eau ($\sim 4,18$ kJ/kg·K)

$T_{\text{sortie}}, T_{\text{entrée}}$: températures de sortie et d'entrée

II. 3. 7 Taux de couverture solaire

$$\text{Taux de couverture} = \frac{Q_{\text{solaire}}}{Q_{\text{solaire}} + Q_{\text{appoint}}} \times 100 \quad \text{II.14}$$

Q_{solaire} : énergie couverte par le solaire

Q_{appoint} : énergie fournie par le système d'appoint

II. 3. 8 Rendement global du système :

$$\eta_{\text{système}} = \frac{Q_{\text{utile}}}{G \cdot A} \quad \text{II.15}$$

Q_{utile} : énergie effectivement utilisée (ex. ECS)

$G \cdot A$: énergie solaire incidente sur les capteurs (en kWh)

II. 3. 9 Économie de CO₂ :

$$\text{CO}_2 \text{ évitée} = Q_{\text{économie}} \cdot f_{\text{CO}_2} \quad \text{II.16}$$

$Q_{\text{économie}}$: énergie évitée (kWh)

f_{CO_2} : facteur d'émission du combustible (ex. 0,23 kg CO₂/kWh pour le gaz)

II.4 Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons découvert les principaux éléments qui composent une installation solaire thermique, depuis les capteurs solaires jusqu'aux systèmes de stockage et de régulation. Chacun de ces composants joue un rôle essentiel pour capter, transférer et utiliser efficacement l'énergie solaire. Nous avons également vu comment il est possible d'estimer les performances de ces installations en prenant en compte différents facteurs, comme l'ensoleillement, l'orientation, ou encore le rendement global du système.

Chapitre III Simulation et interprétation

III.1 Introduction

Le recours aux énergies renouvelables est devenu nécessaire à l'heure actuelle, et cela est dû à ses retombées économiques et naturelles, mais les progrès des études en la matière ont provoqué une crise dans le choix des meilleures, donc dans ce chapitre, nous effectuons des simulation en utilisant le logiciel T*Sol pour une installation pour produire de l'eau chaude sanitaire spécifique avec deux capteur solaires thermiques (capteur solaire a tube CPC, capteur solaire plan) et mener une étude comparative du projet envisagé afin d'évaluer de manière précise le taux de couverture, le rendement, l'efficacité ainsi que le volume de consommation pour choisir le meilleur entre les deux variants.

III.2 Présentation de logiciel

T*SOL est le programme de simulation avec lequel vous pouvez calculer le rendement d'un système solaire thermique. Que ce soit pour le chauffage de l'eau domestique, le chauffage d'appoint, les piscines ou la chaleur industrielle, avec T*SOL, vous pouvez concevoir de manière optimale votre système solaire thermique, dimensionner le stockage et les panneaux de capteurs (également les toits est / ouest) et déterminer l'efficacité économique.

III.3 Spécifications techniques des éléments

L'installation est conçue pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) pour une maison individuelle, et il se compose de : des capteurs a tubes CPC (VAR1) et des capteurs solaire plans (VAR2), un réservoir, pompe, canalisation (circuit solaire), Chauffage d'appoint (chaudière à gaz).[42]

Ces installations permettent:

- De convertir le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à le biais de capteurs

- De transporter la chaleur générée via un réseau de canalisations vers le ballon de stockage ;
- De conserver l'énergie thermique dans le ballon tampon en attente de la demande des utilisateurs.

III. 3. 1 Le capteur plan

Le capteur plan, également appelé capteur solaire thermique à plaque plane, est l'un des dispositifs les plus utilisés dans les installations solaires thermiques, notamment dans le secteur résidentiel. Son rôle principal est de capter le rayonnement solaire pour le convertir en chaleur. Cette chaleur est ensuite transférée à un fluide caloporteur qui circule à l'intérieur du capteur

III. 3. 2 Le capteur a tube CPC

Un capteur à tubes CPC est un système solaire thermique qui combine des tubes sous vide avec un concentrateur parabolique composé (CPC) pour optimiser la capture de l'énergie solaire, même par faible ensoleillement. Il est utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS), le chauffage ou les applications industrielles.

III. 3. 3 L'accumulateur sanitaire

Conçu pour une double fonctionnalité de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire, ce ballon de stockage est disponible en acier standard ou en option inox 316. Sa capacité modulable (de 100 à 800 litres) s'adapte parfaitement aux différents besoins en ECS.

L'équipement intègre deux circuits échangeurs :

- Un échangeur solaire haute performance spécialement dimensionné pour maximiser le rendement thermique
- Un échangeur secondaire dédié à l'appoint énergétique (chaudière externe ou, en option, résistance électrique de 2 kW intégrée)

Doté d'une protection anticorrosion par anode magnésium et d'une trappe d'inspection, le modèle présente une isolation renforcée en polyuréthane rigide avec système de démontage par feuillard.

Sa particularité réside dans sa capacité à fournir instantanément de l'eau chaude à température régulée (minimum 60°C). Le chauffage s'effectue soit par fluide caloporteur circulant dans un échangeur tubulaire ou à plaques, soit par la résistance électrique optionnelle. Le système maintient automatiquement la température de consigne et se réenclenche à chaque soutirage pour garantir une disponibilité permanente d'ECS.[42]

III. 3. 4 Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur joue un rôle essentiel dans les installations solaires thermiques en assurant le transfert de la chaleur collectée par les capteurs vers les différents échangeurs du système (production d'eau chaude sanitaire, chauffage et éventuellement chauffage de piscine).

Ce fluide présente des caractéristiques thermiques exceptionnelles :

- Haute capacité calorifique comparable à celle de l'eau.
- Résistance au gel garantie jusqu'à -35°C.
- Protection anticorrosion intégrée.
- Formulation écologique et biodégradable.
- Stabilité thermique aux températures élevées.[42]

III. 3. 5 Rôle de ballon

Le ballon de stockage joue un rôle fondamental dans les systèmes d'eau chaude sanitaire solaires. Sa conception spécifique répond à deux impératifs techniques majeurs : d'une part, l'équilibrage entre la puissance instantanée de production et les pointes de consommation, et d'autre part, la compensation des variations entre l'apport solaire intermittent et les besoins continus en eau chaude.

Structurellement, l'accumulateur intègre dans sa partie basse un échangeur thermique en serpentin où circule le fluide caloporteur (généralement un mélange eau-glycol). Ce dispositif assure le transfert de l'énergie thermique captée par les panneaux solaires vers le volume d'eau sanitaire. La circulation du fluide s'effectue en circuit fermé entre les capteurs et cet échangeur.

Pour garantir une température constante en toute circonstance, la partie supérieure du ballon est équipée d'un second système de chauffage d'appoint (électrique, chaudière gaz ou autre). Ce dispositif complémentaire prend le relais lorsque l'énergie solaire est insuffisante, maintenant ainsi l'eau de soutirage à la température réglementaire requise.[42]

III. 3. 6 La pompe

Le système de circulation et de régulation assure le transfert optimal de l'énergie thermique dans l'installation solaire. La pompe, élément central du circuit, met en mouvement le fluide caloporteur et permet de réguler son débit avec précision. Couplée à une unité de contrôle intelligente, elle fonctionne de manière synchronisée pour maximiser l'efficacité énergétique.[42]

III. 3. 7 Chauffage appoint

Durant les mois d'hiver ou lors de périodes prolongées de faible ensoleillement, l'énergie solaire ne parvient pas à couvrir la totalité des besoins en eau chaude sanitaire. Pour pallier cette intermittence naturelle, l'installation intègre un système de chauffage d'appoint performant.

Dans notre configuration, cet appoint énergétique est assuré par une chaudière à gaz, spécialement conçue pour compléter l'action du système solaire. Cette chaudière auxiliaire est directement raccordée au ballon de stockage principal via deux dispositifs possibles :

- Un serpentin intégré au ballon.
- Une résistance électrique (solution alternative).[42]

III. 3. 8 Les étapes de simulation

La simulation est réalisée pour faire une comparaison entre deux systèmes solaires destinés à la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Ce logiciel permet d'estimer les différentes puissances, le rendement du capteur solaire, le taux de couverture, ainsi que les variations de température de l'eau dans le réservoir de stockage tout au long de l'année. Il offre également la possibilité de calculer les émissions de CO₂ en kilogrammes. Pour cela, plusieurs données sont nécessaires (voir les figures).

III. 3. 8. 1 Les données techniques du capteur solaire

- Le type de capteur.
- L'orientation et l'inclinaison du capteur.
- Les données climatologiques d'un endroit défini.
- L'irradiation de chaque mois.
- La surface de capteur.
- La température moyenne de chaque mois.
- Type de l'installation : deux échangeurs.
- Le volume du ballon du stockage.
- Les températures d'entrée et de sortie.
- Le type du chauffage d'appoint.

Notre travail consiste à faire une comparaison entre deux configurations du même système installations eau chaude sanitaire [ECS].

Configuration 1 : dans ce système en utilise capteur a tube CPC.

Configuration 2 : dans ce système en utilise capteur solaire plan.

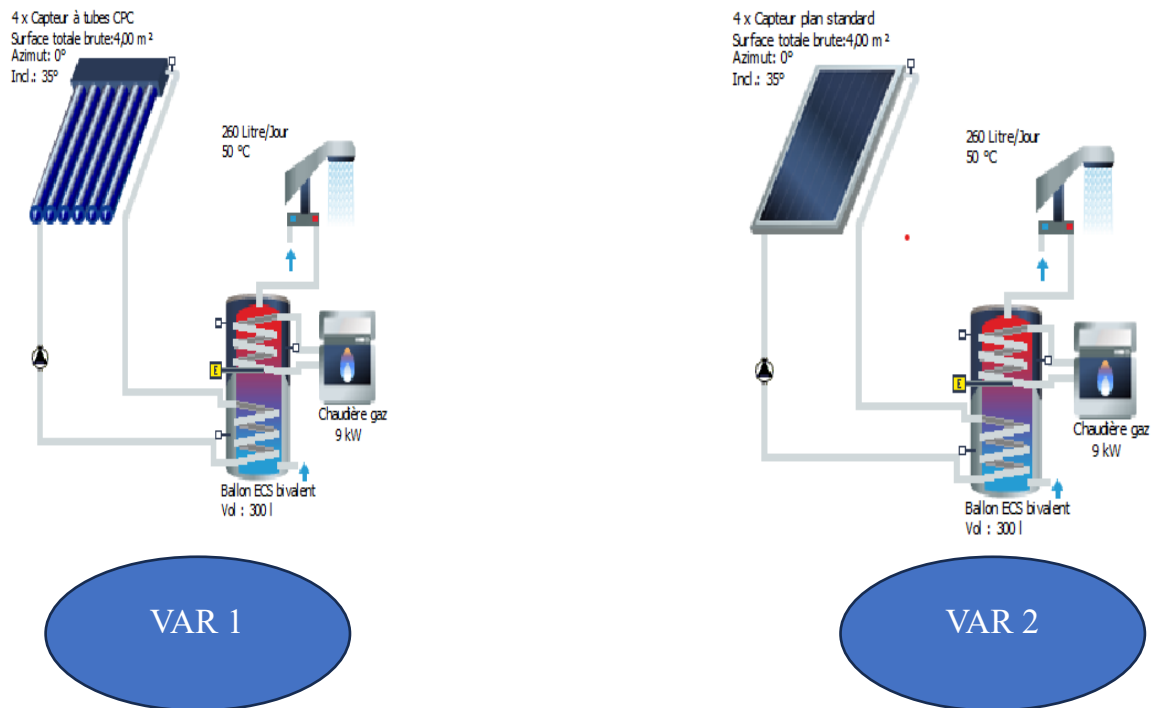


Figure III.1: *Installation de chauffage eau sanitaire*

III.4 Données météorologiques

Pour réaliser notre étude en prend les paramètres météo suivant :

Site : Tlemcen /Zenata

Latitude : 35°

Longitude :1,5

Rayonnement annuel global :1890 ,9 kWh/m²

Température extérieure moyenne :17 ,9°C

Température extérieure min :1 ,7°C

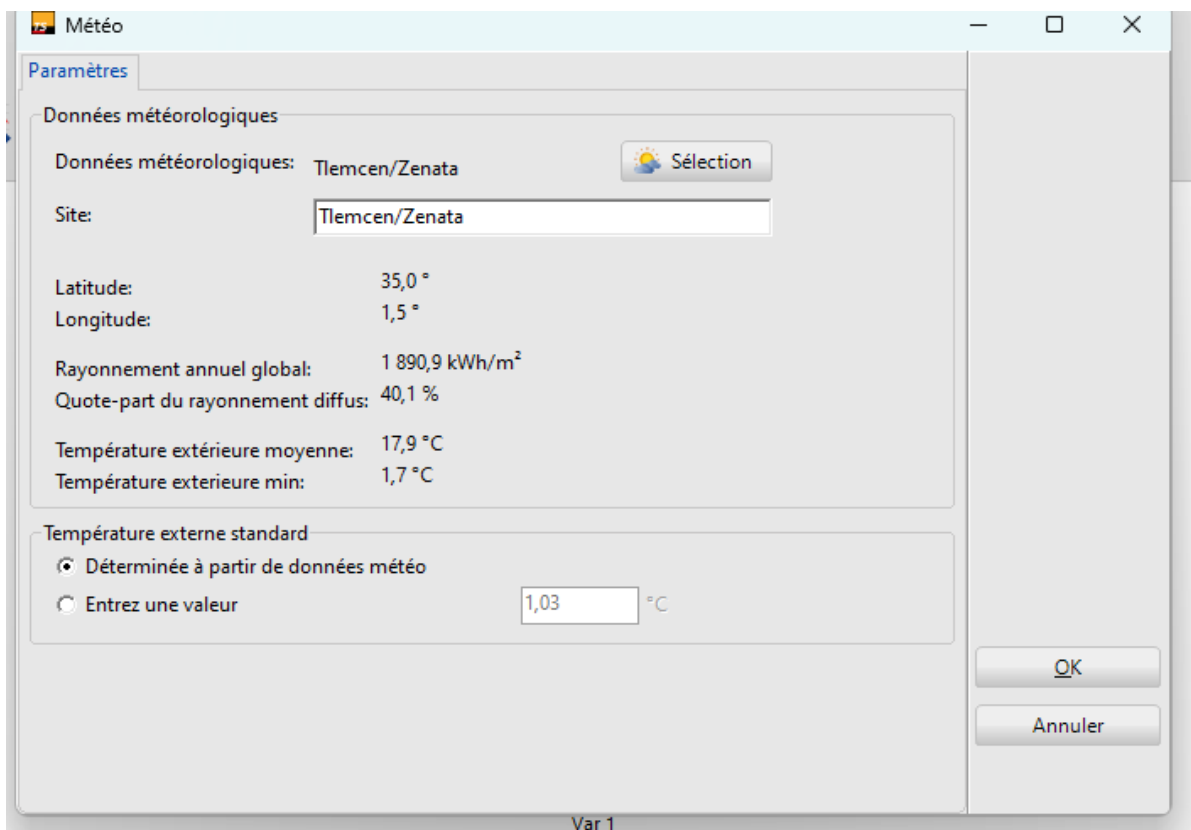


Figure III.2: Les données météorologiques

III.5 Paramètres de l'installation

Le projet a pour objectif de garantir une production continue d'eau chaude sanitaire (ECS) tout au long de l'année pour une maison individuelle située à Tlemcen, dans la commune de Zenata. Le système envisagé comprend des capteurs solaires plans, un réservoir de stockage, une pompe, un circuit de canalisation solaire, ainsi qu'un dispositif de chauffage d'appoint fonctionnant au gaz.

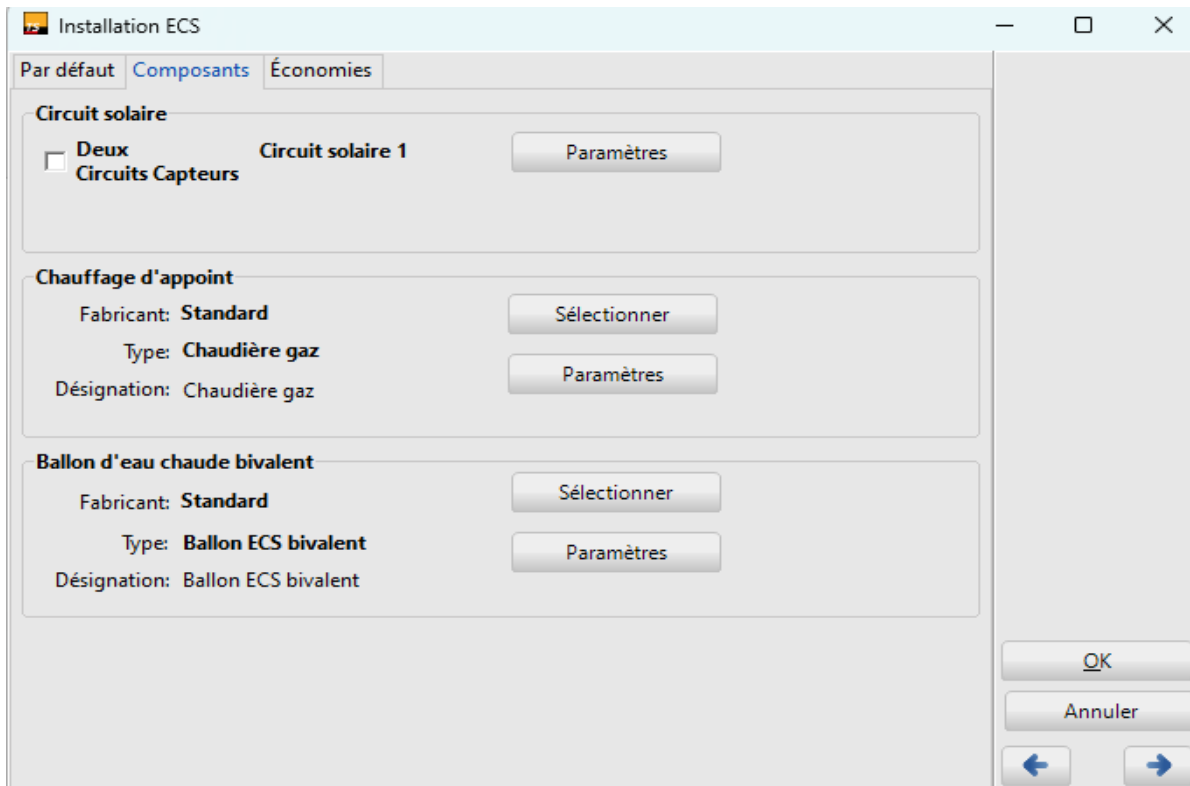


Figure III.3: Paramétrer d'installation

III. 5. 1 Paramètres pour les deux capteurs et le circuit solaire

Nous avons opté pour deux types de capteurs solaires (capteur a tube CPC et capteur plan) suivant les deux configurations ci-dessous (Tableau III-1) :

Tableau III-1:Les donner météorologique

	Vra1	Var2
Fabriquant	Standard	Standard
Type	Capteur a tube CPC	Capteur plan
Désignation	Capteur a tube	Capteur plan

III. 5. 1. 1 Les données techniques pour les deux capteurs

- Surface Total brute: 4m².
- Surface Total de référence : 3,2m².
- Capacité thermique spécifique :6000J/m²k.
- Orientation: (Sud) 180°.
- Angle d'azimut: 0°.
- Inclinaison d'installation: 35°.
- Objectif de couverture: moyen 65%.
- Nombre de capteurs :4.

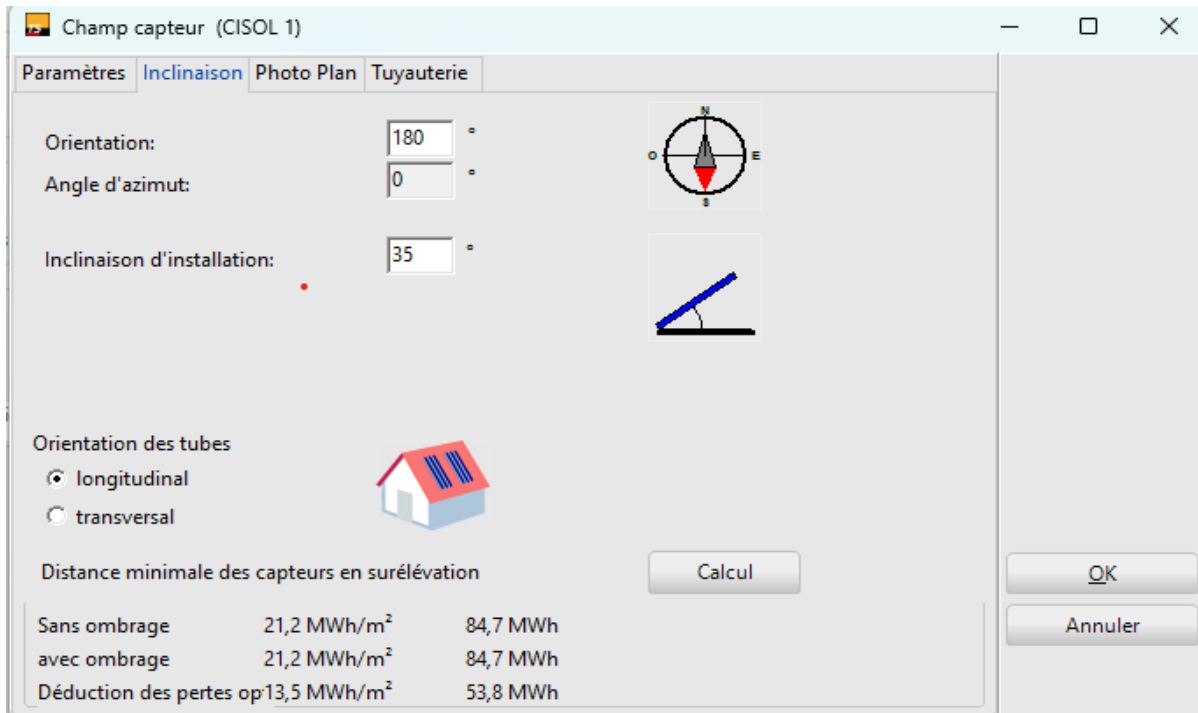


Figure III.4: Paramètre pour l'inclinaison

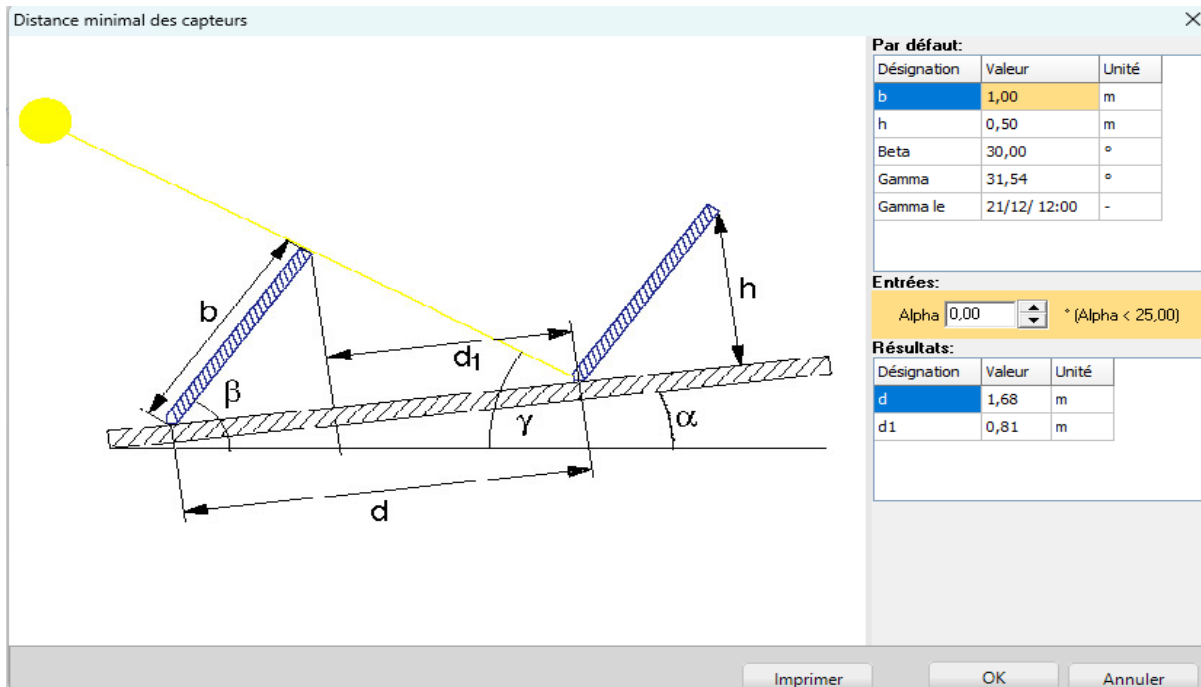


Figure III.5: Distance minimale des capteurs

III. 5. 1. 2 Les données techniques du réservoir de stockage

- Fabricant: Standard.
- Type: Ballon ECS bivalent
- Volume: 300l.
- Hauteur=1.8m.
- Epaisseur de isolation: 100mm.
- Conduction thermique: 0.065w/ (m.k).
- Pertes: 3.23 kWh/jour.
- Taux de perte thermiques : 2.99w/k.

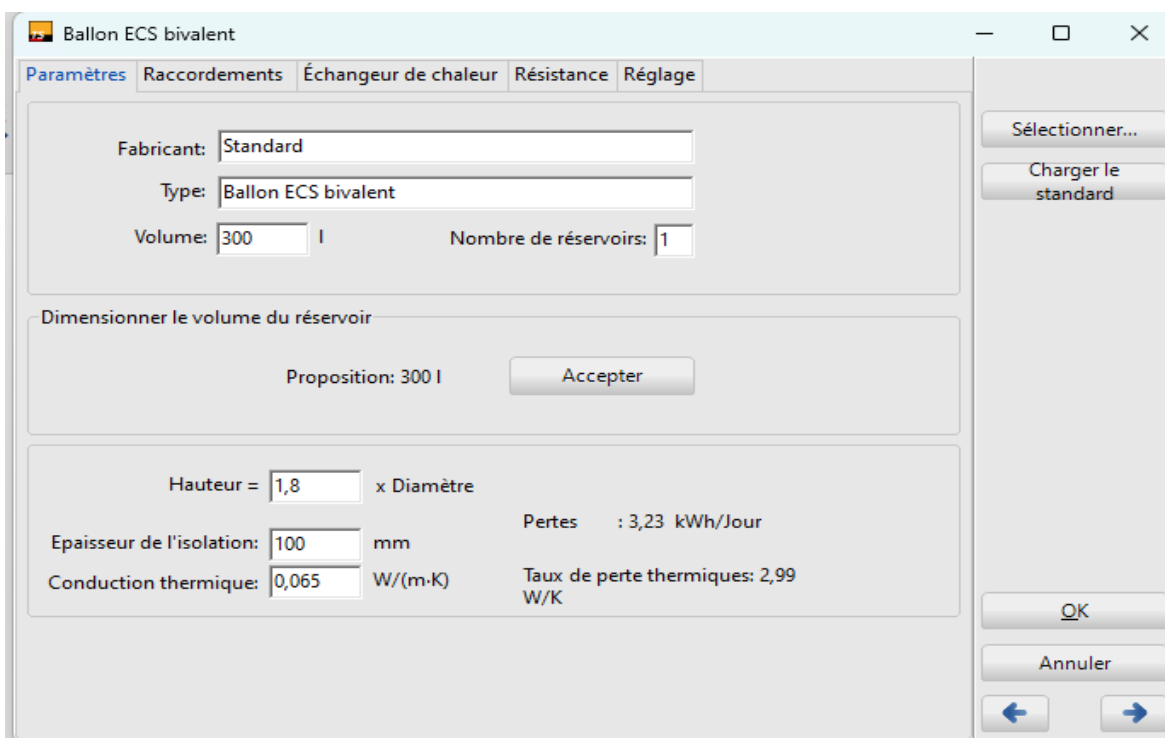


Figure III.4 : Les paramètres de ballon ECS bivalent

III. 5. 1. 3 Circuit solaire :

- Débit volumique : 40 (l/h) /m² (par surface de capteur).
- Eau-glycol: 25% polypropylenglycol.
- Capacité thermique spécifique résultante : 3588 J / (kg°k)
- Circuit solaire marche : 8K (sur la température de référence du réservoir).
- Circuit solaire à l'arrêt : 3K (sur la température de référence du réservoir).

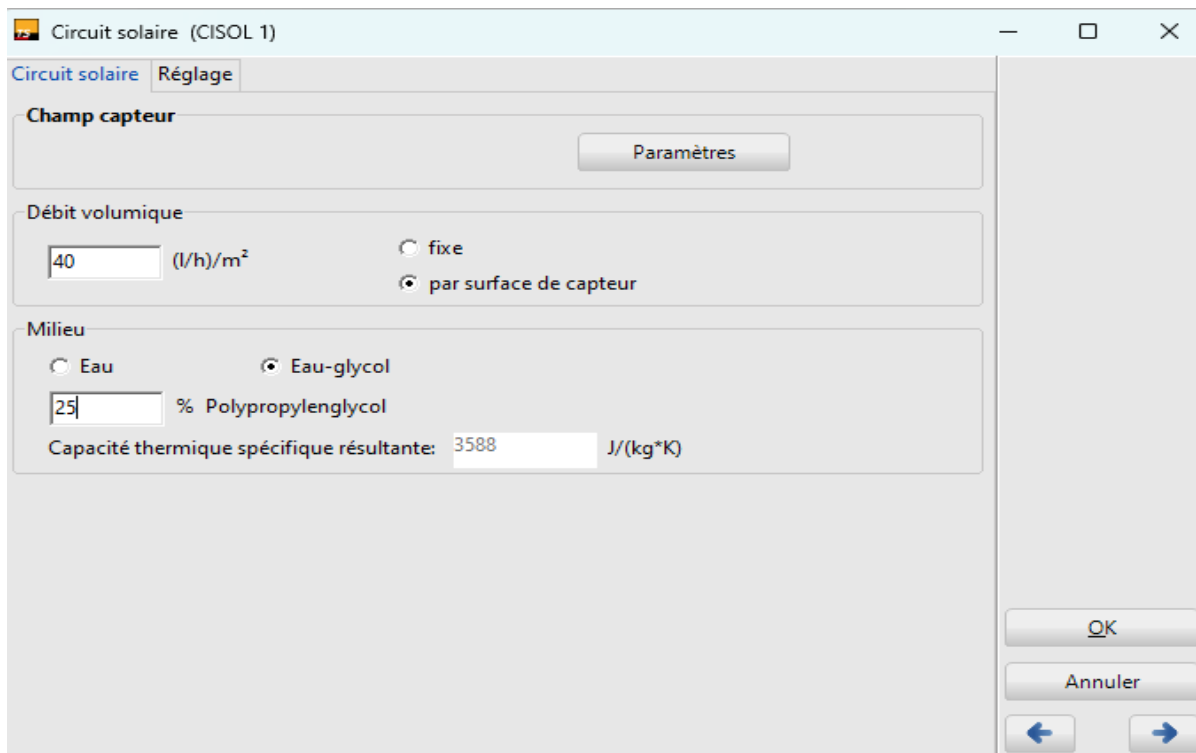


Figure III.5: Les données pour le circuit solaire

III. 5. 1. 4 Le profil de la consommation

Consommation (relatif à la durée service)

- Consommation journalière moyenne: 260l.
- Consommation annuelle :94.9 m³.
- Besoins annuels: 3499kwh.
- Consommation par heure maximale : 3.25kwh.

Températures:

- Température consigne eau chaude : 50°C.
- Température de l'eau froide [16°C,20°C].

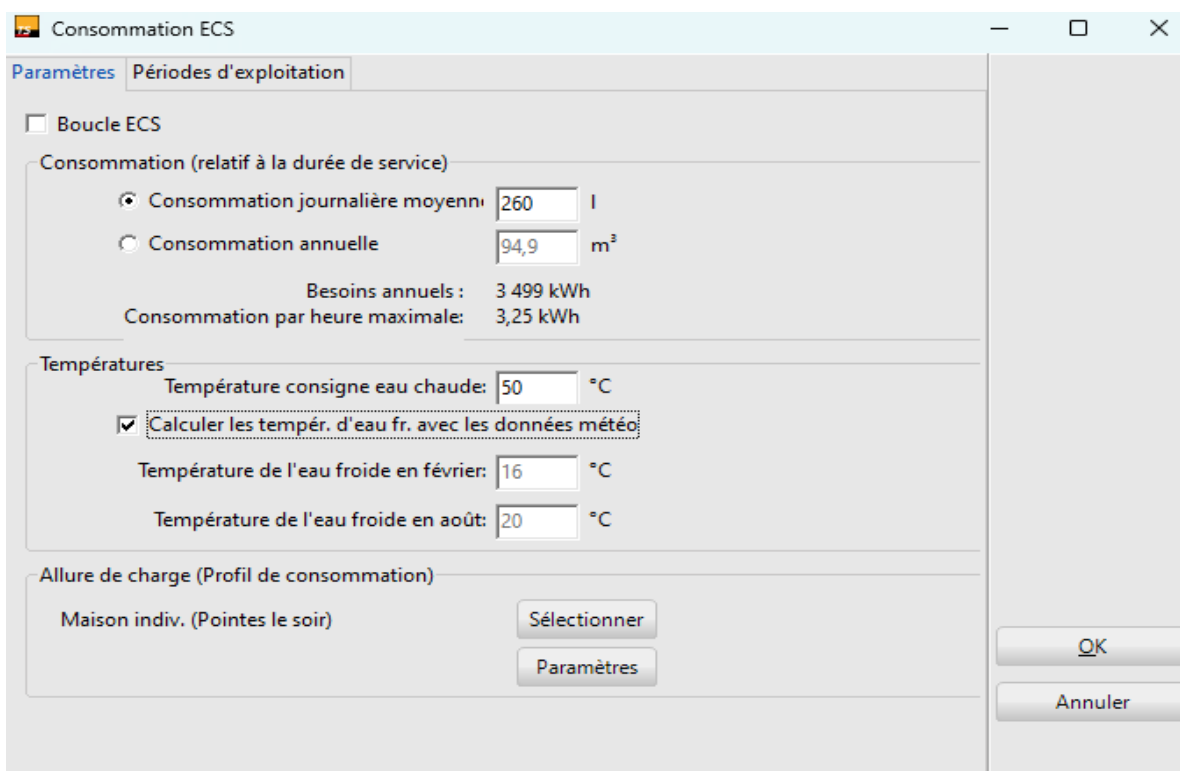


Figure III.6: Les paramètres de la consommation

Les pertes optiques (Figure III-10) :

Le Figure III-10, se représente la variation du rendement optique (ou efficacité de capteur) d'un capteur solaire en fonction de l'angle d'incidence

Le Figure III-10, montre que le rendement des capteurs solaires thermiques dépend fortement de l'angle d'incidence des rayons. La performance est optimale (100%) à 0° (rayons perpendiculaires), puis diminue progressivement : -25% à 30°, -50% à 50°, et chute à moins de 25% au-delà de 70°. Ces résultats soulignent l'importance cruciale de l'orientation des panneaux et suggèrent que les technologies comme les CPC, moins sensibles aux angles, pourraient améliorer les performances, surtout en début/fin de journée. Pour Tlemcen, un réglage optimal selon la latitude locale ($\approx 34^\circ$) permettrait de maximiser la production annuelle.

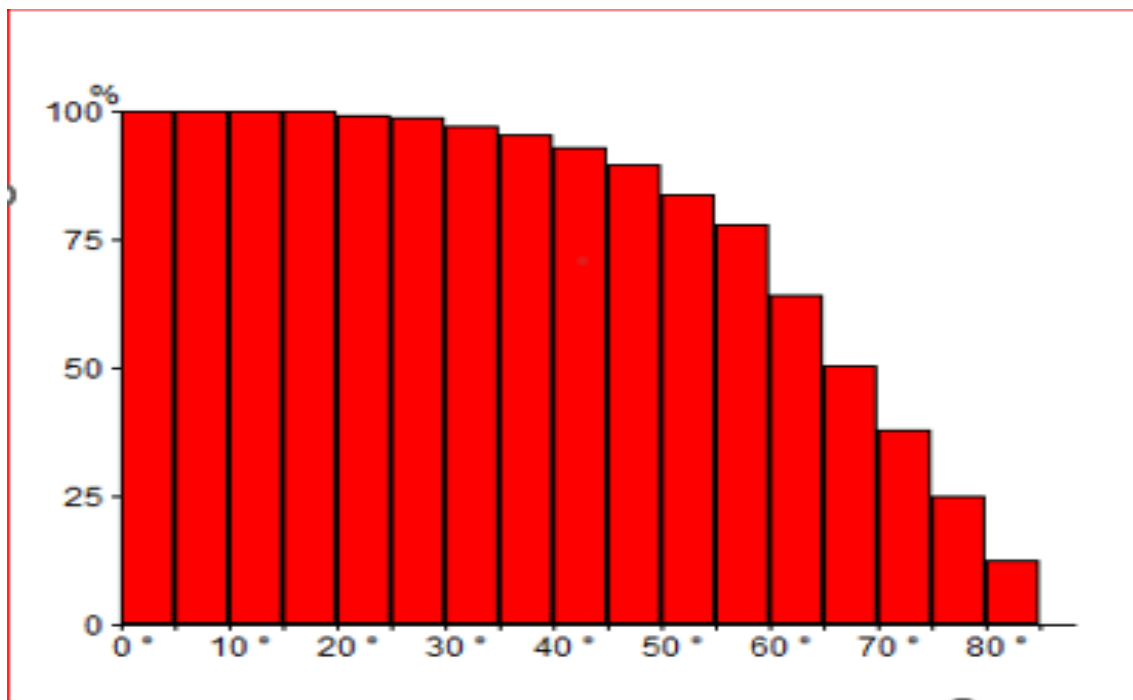


Figure III.7: Les pertes optiques

Les données techniques du chaudière gaz (Figure III-11)

- Fabricant: Standard
- Type: Chaudière gaz
- Type de Chaudière: Chaudière
- Puissance nominale: 9 KW

Dimensionnement de la puissance

- Proposition :23 kW

Ressources énergétiques

- HI(PCI) :37512 KJ /m³
- Hs (PCS) :41112 KJ/m³

The screenshot shows a software window titled "Chaudière gaz" with two tabs: "Paramètres" (selected) and "Rendement". The "Paramètres" tab contains several sections:

- Fabricant:** Standard
- Type:** Chaudière gaz
- Type de chaudière:** Chaudière gaz
- Puissance nominale:** 9 kW
- Dimensionnement de la puissance:** Proposition: 23 kW, with an "Accepter" button.
- Ressources énergétiques:** Gaz naturel H, Hi (PCI) = 37512 kJ/m³, Hs (PCS) = 41112 kJ/m³.
- Périodes d'exploitation:** A calendar grid with all months (Jan to Dec) highlighted in green, indicating 365 days of operation.

On the right side of the window, there are buttons: "Sélectionner...", "Charger le standard", "OK", "Annuler", and navigation arrows.

Figure III.8: Les paramètres de chaudière

III.6 Présentation de résultats et interprétation

Le schéma de l'installation pour les deux variant

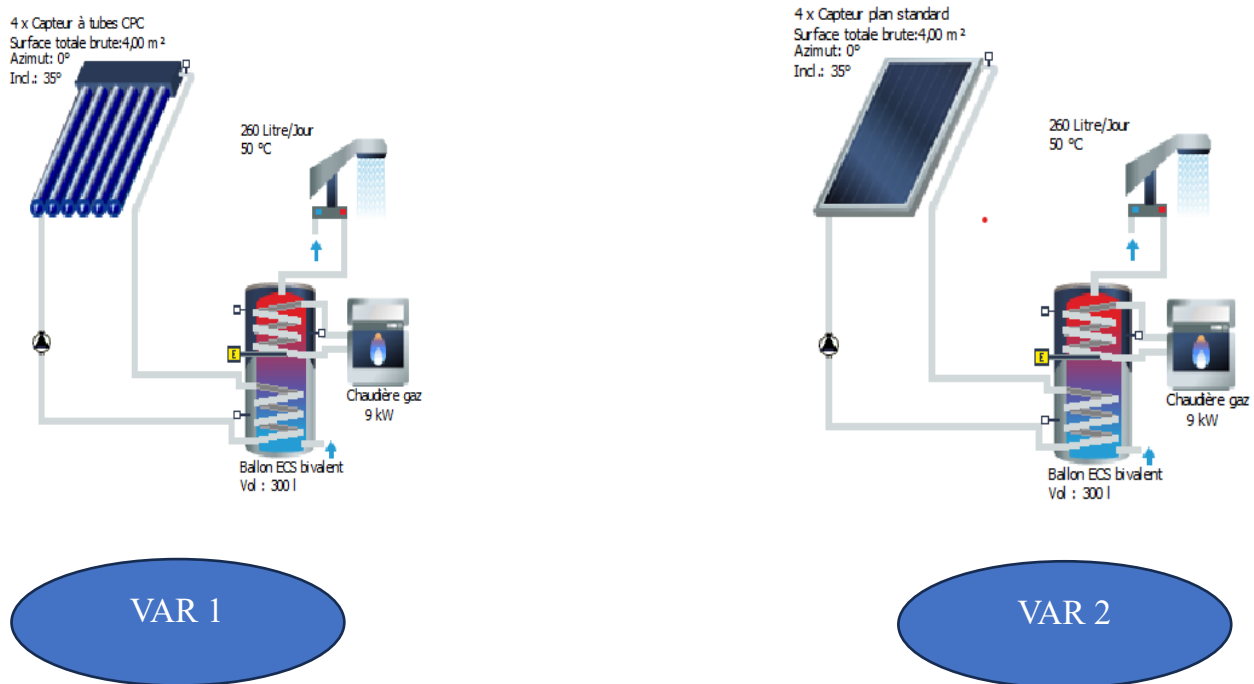


Figure III.9: Installation ECS

III. 6. 1 Énergie solaire eau chaud sanitaire (ECS) et énergie d’appoint et énergie et énergie pour le ballon (Figure III .10) :

Le figure III.10se représente énergie solaire ECS et énergie d’appoint et énergie et énergie pour le ballon en termes de mois de l’année.

D’après figure III.10, on remarque que l’énergie solaire utile fournie par VAR 1(le capteur CPC) est de 3520 kWh contre 3173 kWh pour VAR2(le capteur plan) ce qui montre une meilleure performance du VAR 1(capteur CPC)cette différence se traduit aussi par une réduction significative de l’énergie d’appoint qui est de seulement 468 kWh pour VAR1 (le capteur CPC) contre 751 kWh pourVAR2 (le capteur plan) cela s’explique par le fait que le capteur CPC capte mieux le rayonnement solaire diffus et conserve mieux la chaleur en période froide ce qui améliore le rendement global de l’installation sur l’année.

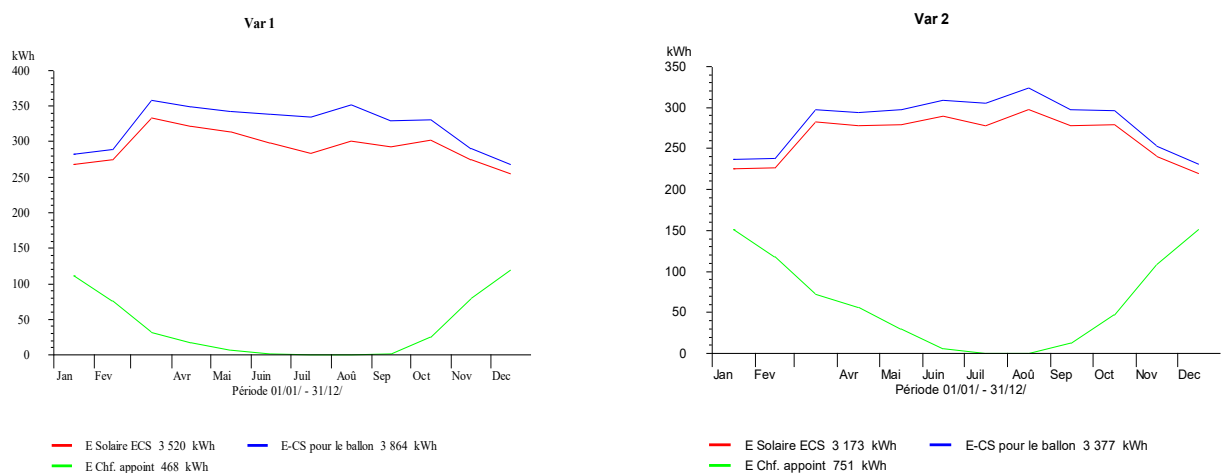


Figure III.10: Energie solaire ECS et énergie d’appoint et énergie et énergie pour le ballon

III. 6. 2 Économie du gaz naturel (Figure III.11)

Le figure III.11, représente l'économie de gaz naturel en termes de mois de l'année.

D'après figure III.11, On remarque que l'installation pour VAR1(capteur CPC) permet une économie annuelle de 543 m³ de gaz naturel, contre 494 m³ pour VAR2 (le capteur plan). Cela confirme que VAR1(capteur CPC) est plus performant, surtout en hiver, car il permet une meilleure couverture des besoins en eau chaude sanitaire, réduisant ainsi davantage la consommation de gaz. La différence s'explique par le meilleur rendement du capteur CPC en conditions moins favorables comme les faibles températures et le rayonnement diffus.

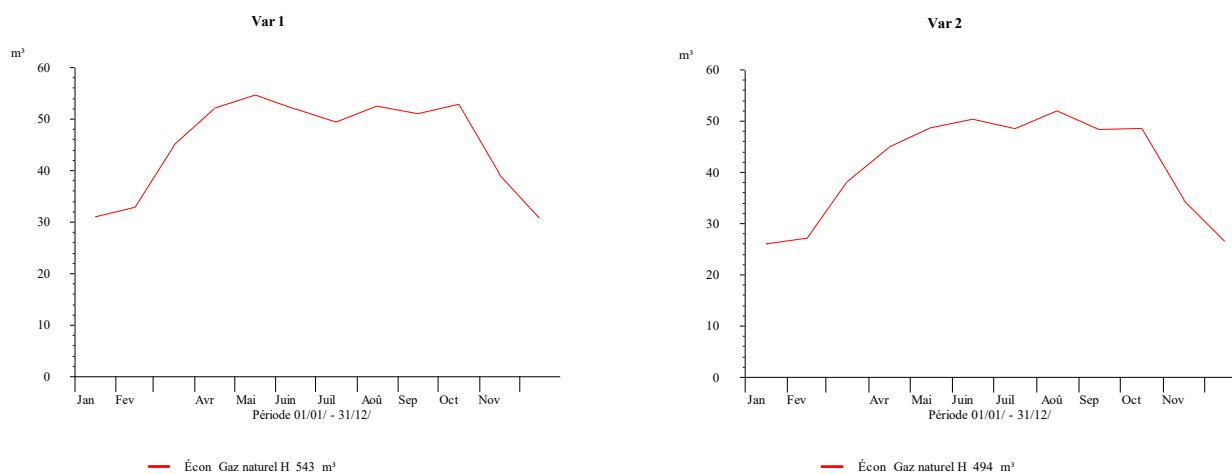


Figure III.11: L'économie du gaz naturel

III.7 Emission de CO₂ évitée (Figure III.12)

Le figure III.12 représente les émissions de CO₂ en termes de mois de l'année.

D'après figure III.12, on remarque que VAR1 (le capteur CPC) permet d'éviter davantage d'émissions avec un total annuel de 1149 kg de CO₂ contre 1045 kg pour VAR2 (capteur plan) cette différence s'explique par le meilleur rendement du capteur CPC qui réduit davantage la consommation d'énergie fossile en particulier en hiver ce qui entraîne une diminution plus importante des émissions de gaz à effet de serre sur l'année.

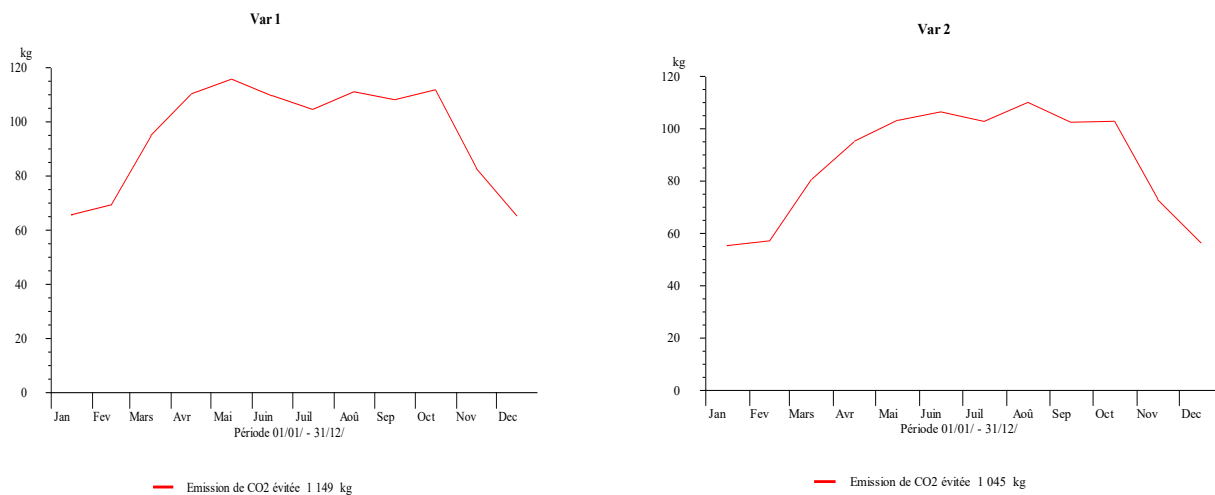


Figure III.12: Emission de CO₂ évitée

III.8 Taux de couverture et Rendement (Figure III.13)

Figure III.13 représente le taux de couverture ECS et rendement de système en termes de mois de l'année.

D'après figure III.13, En remarque que taux de couverture ECS pour variant 1 (capteur CPC) est plus élevé par pour variant 2 (capteur plan) avec un pic atteignant environ 88 % pour var1 et 81%pour 2 (capteur plan) avec un pic atteignant environ 42% pour var1 et 37%, et la déférence est plus grand surtout en hiver et faible de l'été soit pour Taux de couverture ECS ou Rendement de système, e qui était attendu puisque ces capteurs sont plus efficaces en hiver.

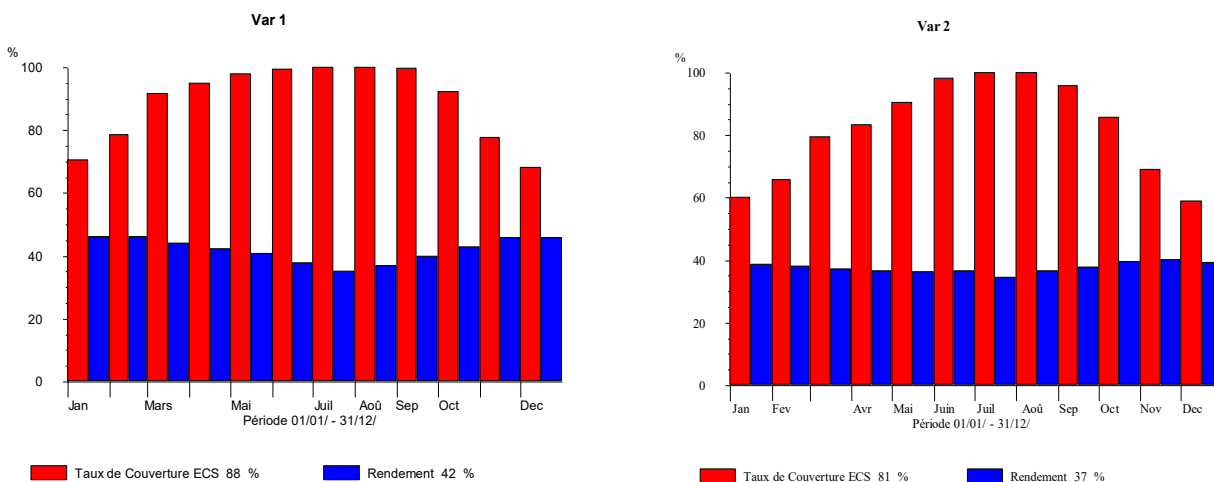


Figure III.13: Taux de couverture et Rendement

III.9 La part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie (Figure III.14)

Figure III.14 représente la part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie pour deux variantes en termes de mois de l'année.

D'après figure III.14, en remarque que l'énergie solaire produite :3520 kWh et consommation 3968 kWh pour var1 est plus élevé que var2, énergie solaire produite 3173 kWh et consommation 3 924 kWh, ce qui s'explique par leur capacité à mieux capter le rayonnement diffus, surtout en hiver.

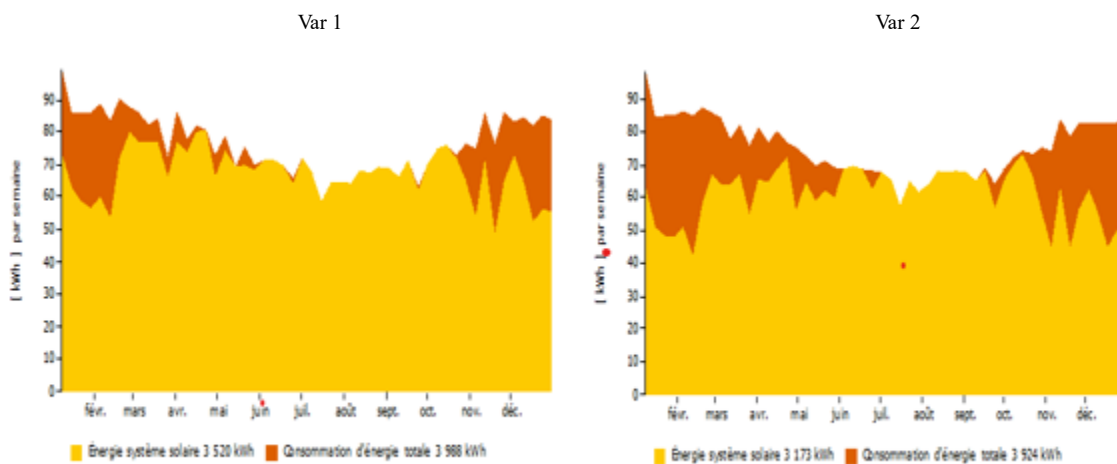


Figure III.14: la part de l'énergie solaire par rapport à la consommation d'énergie

III.10 Température maximale journalière dans le capteur (Figure III.15)

Figure III.15 représente l'évolution de la température maximale journalière mesurée dans un capteur solaire thermique en termes de mois de l'année :

D'après figure III.15, on observe que l'évolution de la température maximale journalière mesurée dans un capteur solaire thermique pour var 1 (Capteur CPC) est plus important. Ainsi, la température maximale journalière atteint souvent entre 80°C et 100°C pour Var1 (Capteur CPC) affiche et contre pour VAR2 reste généralement entre 60°C et 80°C, avec des baisses jusqu'à 40°C en hiver, cette différence de température a cause de le capteur CPC Possède une meilleure isolation thermique et une plus grande sensibilité aux changements d'ensoleillement.

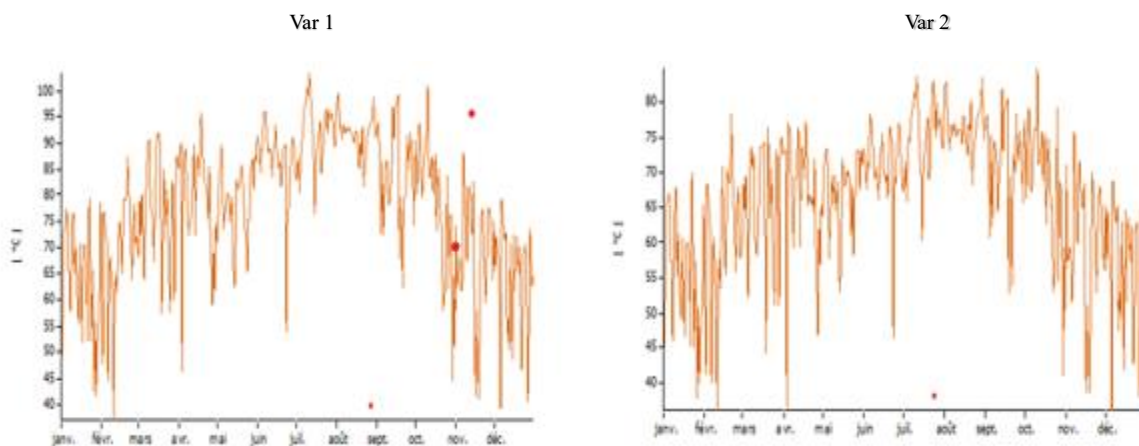


Figure III.15: *Température maximale journalière dans le capteur*

III.11 L'évolution de deux indicateurs financiers (Figure III.16)

Figure III.16 présente l'évolution de deux indicateurs financiers sur une période de 20 années de service.

D'après figure III.16, Le Var 1 dispose d'un budget plus conséquent (1 405 485 DZD contre 737 905 DZD pour le Var 2) et a déjà investi l'intégralité de ses fonds, tandis que le Var 2 conserve une réserve de 232 000 DZD illustrant une gestion plus prudente. Les deux stratégies incluent un autofinancement via un compte bancaire, mais le Var 1 bénéficie d'un taux d'intérêt légèrement supérieur (8,22 % contre 7,41 %), ce qui peut suggérer des conditions plus favorables ou une plus grande prise de risque. Ainsi, le Var 1 semble adopter une approche dynamique en mobilisant tous ses moyens, alors que le Var 2 privilégie une stratégie conservatrice en gardant une marge de sécurité. Le choix entre ces deux profils dépendra des priorités : viser une rentabilité maximale en acceptant plus de risques, ou rechercher la sécurité financière au détriment d'un rendement immédiat.

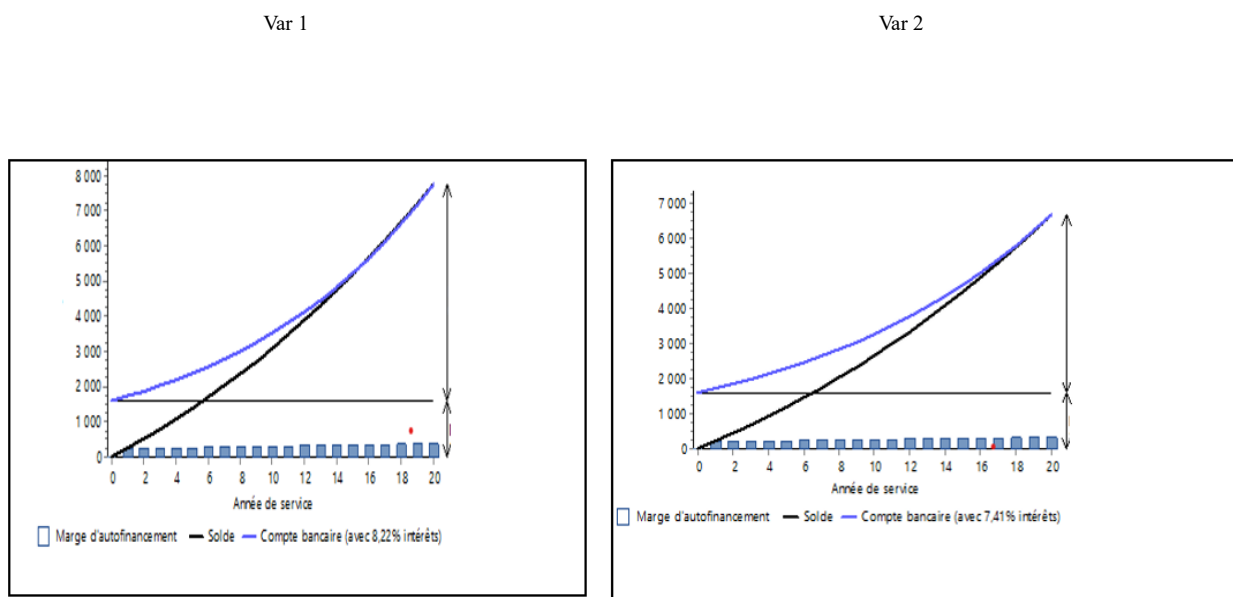


Figure III.16: L'évolution de deux indicateurs financiers

III.12 Conclusion

Les résultats de simulation comparant deux configurations utilisant du gaz naturel H comme appoint révèlent des performances distinctes pour un système solaire thermique couplé à un ballon ECS bivalent de 0,3 m³.

Tableau III.2: Résultats de simulation annuelle pour les deux variants

Résultat	VAR 1	VAR 2
Irradiation sur la surface totale des capteurs	8474 KWh	8474KWh
Irradiation sur la surface spécifique des capteurs	2118.46KWh /m ²	2118.46KWh/m ²
Energie par le circuit de capteur	3864KWh	3377KWh
Energie délivrée générée par le circuit solaire	965.90KWh/m ²	844.29KWh /m ²
Apport de l'énergie pour l'appoint	468KWh	751KWh
Rendement système	41.53%	37.44%
Taux de couverts totale	88.26%	80.85%
Energie fournir par chauffage eau sanitaire	3512 KWh	3512 KWh
Taux de couverture pour eau chaud	88.26%	80.85%
Energie système solaire pour l'ECS	3520KWh	3173KWh
Economie de carburant	543.2m ³	491.1m ³
Emission de CO ₂ évite	1148.8Kg	1044.8Kg

L'irradiation solaire identique (8 474 kWh au total, soit 2 118,46 kWh/m²) met en lumière des écarts significatifs : la première configuration délivre une énergie solaire de 3 864 kWh (965,90 kWh/m²), contre 3 377 kWh (844,29 kWh/m²) pour la seconde, soit un gain de 14% pour la première solution. Le rendement système suit cette tendance, avec 41,53% contre 37,44%, confirmant une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Le taux de couverture total pour l'eau chaude sanitaire (ECS) atteint 88,26% dans le premier cas, contre 80,85% dans le second, réduisant ainsi le recours à l'appoint gaz de 40% (468 kWh vs 751 kWh). Les économies de carburant (543,2 m³ vs 494,1 m³) et les émissions de CO₂ évitées (1 148,8 kg vs 1 044,8 kg) soulignent l'avantage écologique de la première configuration, avec 10% de réduction d'émissions supplémentaire. Ces données démontrent qu'une optimisation du système solaire peut significativement améliorer l'efficacité énergétique (jusqu'à +11% de rendement), la durabilité économique (moins d'appoint gaz) et l'impact environnemental, tout en maintenant les mêmes besoins en ECS (3 512 kWh). Une piste d'amélioration pourrait explorer l'ajustement de la surface capteur ou l'isolation du ballon pour maximiser ces gains.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude concerne les systèmes solaires thermiques dans un site localisé à Tlemcen. Les résultats obtenus, bien que chiffrés, traduisent une réalité tangible pour les occupants de l'habitable en question : le choix entre capteurs plan sous vide (CPC) et capteurs plans (CP) n'est pas qu'une question de rendement énergétique, mais aussi de qualité de vie, protection d'environnement et d'accessibilité financière.

Les simulations détaillées montrent que les capteurs CPC, avec leur rendement supérieur de 20 à 30%, représentent bien plus qu'une simple amélioration technologique. Pour une famille type de 4 à 5 personnes, cela se traduit concrètement par une eau chaude disponible même pendant les courtes journées d'hiver, réduisant ainsi le recours aux systèmes d'appoint coûteux. L'économie annuelle de 2,5 tonnes de CO₂ équivaut à planter 60 arbres chaque année - un héritage environnemental précieux pour les générations futures.

Cependant, cette performance a un coût humain réel. Le surinvestissement initial de 40 à 50% représente pour beaucoup de familles plusieurs mois de salaire, une barrière psychologique et financière difficile à franchir sans accompagnement. La complexité d'installation des CPC nécessite une formation spécifique, créant ainsi à la fois des défis et des opportunités d'emploi qualifié.

Face à ce constat, une solution équilibrée émerge :

- Pour les écoles, mosquées et bâtiments publics, où la consommation est collective et les budgets plus flexibles, les CPC offrent une solution optimale
- Pour les foyers modestes, les capteurs plans restent une alternative réaliste et immédiatement accessible
- Les programmes de formation pour installateurs locaux pourraient créer des emplois tout en facilitant l'adoption des nouvelles technologies

Conclusion générale

Cette recherche nous rappelle qu'une transition énergétique réussie doit concilier trois dimensions :

- Technique (performance des systèmes), Économique (coût et rentabilité), Humaine (acceptabilité, impact social).

Ainsi, le principal critère de choix reste la fiabilité et la simplicité d'utilisation, bien avant les considérations techniques pures. C'est pourquoi toute politique d'incitation devrait s'accompagner d'un volet pédagogique important expliquant les avantages concrets au quotidien.

En définitive, cette étude ne se limite pas à comparer des technologies, mais esquisse les contours d'une transition énergétique inclusive pour la région de Tlemcen ou toute autre région, où progrès technique et justice sociale pourraient avancer de concert.

Références bibliographiques

- [1] OUSSAMA, H. et AHMED, B. Amine (2017). Dimensionnement d'un Chauffe-eau Solaire. Mémoire de fin d'études. Ouargla : Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [2] QuelleEnergie.fr. Chauffe-eau solaire : prix, installation et aides financières. <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/chauffe-eau-solaire/installation>
- [3] GuideNR. Les différents types de chauffe-eau solaires individuels (CESI). Solaire Thermique. https://www.solairethermique.guidenr.fr/VI_differeents-types-cesi.php
- [4] Khaled,B. Étude des systèmes énergétiques solaires innovants. Thèse de doctorat en Génie Énergétique. Ouargla : Université Kasdi Merbah,2020.
- [5] Hichem,M. Mise au point d'un dispositif autonome de poursuite du soleil - SUN TRACKER . Thèse de doctorat. Oran : Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO), 2012.
- [6] KHARCHI, R., HAMID, A., et BELHAMEL, M. (1999). Contribution de l'Energie Solaire dans le Chauffage de l'Habitat par le Plancher. In : National Workshop on Renewable Energies Valorisation, 1999.
- [7] OUDRANE, Abdellatif. (2018). Contribution à la modélisation et au développement des systèmes de chauffage solaire à usage individuel . Thèse de doctorat. Oran : École Nationale Polytechnique d'Oran - Maurice Audin, 2018.
- [8] Connaissance des Énergies. (S.d.). Fiche pédagogique : Solaire thermodynamique à concentration. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration>
- [9] KOYUNCU, T. (2006). Performance of Various Designs of Solar Air Heaters for Crop Drying Applications. Renewable Energy, Vol. 31, N°7, pp. 1073–1088, 2006.
- [10] YUCEF-ALI, S. et DESMONS, J.Y. (2006). Numerical and Experimental Study of a Solar Equipped with Offset Rectangular Plate Fin Absorber Plate. Renewable Energy, Vol. 31, N°13, pp. 2063-2078, 2006.2063 – 2075, 2006.
- [11] NJOMO, D. (1998). Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-verre . Revue Générale de Thermique, Vol. 37, N°11, pp. 973-980, 1998.
- [12] GUNERHAN, H. et HEPBASLI, A. (2007). Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. Building and Environment, vol. 42, pp. 779-783, 2007.
- [13] DALILA, A. (2010). Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives. Thèse de magister. Université EL-HADJ LAKHDAR-BATNA, 2010, pp. 17-39 ,2010.

Références bibliographiques

- [14] BARGACHA, M.N., TADILI, R., DAHMANI, A.S. et BOUKALLIOUCHE, M. (2004). Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1073-1083, 2004.
- [15] HO, C.D., YEH, H.M., CHENG, T.W., CHEN, T.C. et WANG, R.C. (2009). The influences of recycle on performance of baffled double-pass flat-plate solar air heaters with internal fins attached [en ligne]. *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1470-1478, 2009. *Applied Energy* 86 (2009) 1470–1478
- [16] ANG, R. S. [et al.] (2008). "Advanced solar thermal energy applications". *Renewable Energy Journal*, 33(4), 512-520
- [17] SANDALI Messaoud. Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux [en ligne]. Thèse de magister en génie mécanique 'Énergétique'. Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid Faculté de technologie, 2013 /2014
- [18] ADEGIONANNI, A. (1981). Conduction In : *Techniques de l'ingénieur*, BE 8 200. Paris : Techniques de l'ingénieur, 1981.
- [19] PETIT, J.P. (1979). Notions de transferts thermiques par convection [en ligne]. In : *Techniques de l'ingénieur*, A 1 540. Paris : Techniques de l'ingénieur, 1979.
- [20] SOUAD, S. (2010). Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan. Université Constantine 1, [Thèse de magister.], 2010, pp. 05-19.
- [21] APEX ENERGIES. Mentions légales : APEX ENERGIES. Disponible à l'adresse : <https://www.apexenergies.fr>
- [22] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET DES ÉNERGIES RENOUVELABLES. Stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie. Alger : Ministère de la Transition Énergétique, 2021
- [23] ADEME. (2023). Rapports sur les énergies renouvelables et les aides financières. Angers : Agence de la transition écologique. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables> .
- [24] PNUD ALGÉRIE. (2020). Étude de faisabilité technico-économique sur l'intégration du solaire thermique dans le secteur résidentiel. Alger : Programme des Nations Unies pour le développement.

Références bibliographiques

- [25] GIZ ALGÉRIE. (2019). Marché du solaire thermique en **Algérie**. Alger : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. Disponible sur www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F23528
- [26] H, BOUALI ; N, DESLAY ; Z, BOURTA ; H, ANJAR, Guide d'une installation solaire thermique, Revue des Energies Renouvelables,2024.
- [27] BENSACI K., BELMOKHTAR A. Étude et réalisation d'un capteur solaire à air Écologique. Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Département de Génie Mécanique ,2017.
- [28] J.M. Chassériaux : Conversion thermique du rayonnement solaire, collection DUNOD,1984
- [29] François Veynandt, —Cogénération hélio thermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel : modélisation de l'ensemble du procédé, | Université de Toulouse, 2011
- [30]. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [31] Benkhalifa Abdelaziz, « Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur », Mémoire MASTER Université Kasdi Merbah Ouargla 2012.
- [32] Harma, W. (2020). L'étude d'un capteur solaire thermique à air [Thèse de master], Université Ahmed Draia - Adrar]. p. 23.
- [33] **Mr** SAAD Arezki et **Mr** DAMOUS Hakim, « Etude et conception d'un chauffe-eau solaire, » Faculté de génie de la construction, Tizi-Ouzou, 2017/2018.
- [34] OMAR, A. Etude de l'effet des paramètres sur les performances d'un capteur solaire plan à fluide liquide dans le site d'Ouargla, Kasdi Merbah Ouargla, 2018 /2019
- [35] Abdellaoui Med Khimmusti et Fouad, G. Etude expérimentale d'un bassin d'eau utilisé comme capteur solaire plan, université de Ouargla
- [36] Nedjemeddine, N. (2018). Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique [Thèse de master], Université Badji Mokhtar Annaba ; p44
- [37] OUCHET, M., ALLARD, Francis. Ballon de stockage. In : XPair2025.Disponible l'adresse : https://www.xpair.com/lexique/definition/ballon_de_stockage.htm

Références bibliographiques

[38] BRENET, Lucien. Chauffe-eau solaire. Fluide caloporteur. <https://www.climamaison.com/>

[39] SANDALI, M. (2014). Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux [Thèse de MASTER], Université Abou Baker Belkaid]. p. 64.

[40] ROCDACIER. (2017). Cours de tuyauterie industrielle : généralités : Rocardier. Disponible à l'adresse : <https://www.rocdacier.com/>

[41] Total Energies. Échangeur thermique : fonctionnement, types et efficacité. Total Energies FR.

[42] Azouz Mohammed chams Eddine et Embarek Noureddine. Simulation d'un système solaire thermique destiné à une habitation. Mémoire de fin d'études. Tlemcen : Université Abou Bakr Belkaid, 2021, p. 54-56